

Джон М. Чарап
Объяснение Вселенной.
Новая эра физики



Дж. Чарап

Объяснение Вселенной.

Новая эра физики

Перевод с английского
Г.К. Селиверстовой

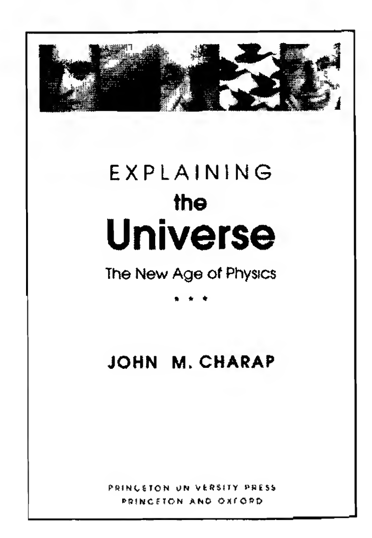
ТЕХНОСФЕРА
Москва
2007

Чарап Дж.
Объяснение Вселенной. Новая эра физики

Москва:
Техносфера, 2007. – 192с., 8с. цв. вклейки ISBN 978-5-94836-112-3

Джон Чарап предлагает обзор физического мира, каким мы его видим в начале XXI столетия. Благодаря открытиям в области физики мы живем в мире большей опасности и большего комфорта, меньших физических частиц и большего количества идей. Чарап представляет эти идеи, но избавляет нас от связанных с ними математических выкладок. После исчерпывающего обзора трансформации физической науки в XX столетии он обращается к последним открытиям в области физики частиц, астрофизики, теории хаоса и космологии. Подводя читателей к самому краю спекулятивных идей, он объясняет, каким образом теория суперструн может в конечном итоге объединить квантовую механику с общей теорией относительности, чтобы создать универсальную квантовую теорию тяготения.

Прочитав эту книгу, человек, далекий от физики, познакомится с общим принципом неопределенности Гайзенберга, а физики могут узнать что-то новое. Студенты получат доступ к спорным физическим концепциям, а поэты усвоят новую лексику, чтобы затем описать множество чудес во Вселенной. Проделав с нами мысленный путь от ультрафиолетовой катастрофы, опрокинувшей ньютоновский мир, до Всеобщей теории завтрашнего дня, Чарап приблизил самые захватывающие современные научные знания к Земле, и мы все можем узнать об этих новых открытиях.



ISBN 978-5-94836-112-3
ISBN 0-691-00663-6 (англ.)

Содержание

ПРЕДИСЛОВИЕ

Начало века мне представляется вполне подходящим временем для того, чтобы поразмышлять о физике. Какие вопросы до сих пор остаются без ответа, какие неразгаданные тайны продолжают будоражить умы? Их диапазон колеблется от интереса к основам мироздания, таким как пространство и время, до специфических проблем, например безопасного хранения ядерных отходов. Я даже приблизительно не смог бы их перечислить. Но мне бы хотелось рассказать о тех огромных успехах, которых мы достигли в двадцатом веке, стремясь понять физические законы, управляющие Вселенной, и о тех новых вопросах, которые встали перед нами в результате этих открытий. Все научные утверждения являются гипотетическими, и в этом их сила. Потому что они основываются не на общепринятой догме, которая противопоставляет оппозиционному мнению излишнюю категоричность или уводит от сути проблемы. Гибкость и авторитет науки основываются скорее на приобретающей все большую актуальность системе поощрения постоянной конфронтации с экспериментальными работами и на внутренней связи и устойчивости ее законов и вытекающих из них следствий. Конечно, всегда существует вероятность того, что мы ошибаемся и что некие фундаментальные изменения завтра могут опровергнуть господствующие сейчас взгляды. Но даже если новые идеи такого масштаба, как теории начала века (например, квантовая механика и теория относительности) вынудят нас пересмотреть те парадигмы, которые мы сегодня принимаем за основы физики, это не значит, что нам следует отказаться от всех современных представлений в этой области. Физика Ньютона считается устаревшей, но она по-прежнему выделяется из релятивистской квантовой физики как выдающаяся теория, объясняющая устройство Вселенной, а ее язык и структура все еще продолжают служить физике начала третьего тысячелетия.

Сто лет назад некоторые ученые считали, что все уже почти открыто; даже в наше время есть такие люди, которые говорят нечто подобное. Но я уверен, что двадцать первый век будет не менее знаменателен гениальными прозрениями и открытиями, чем предшествующий. В прошлом столетии ученые придерживались мнения, что возраст Вселенной составляет примерно 100 миллионов лет. В настоящее время мы уверены в том, что он составляет не менее 13 миллиардов лет. В 1900 году самыми маленькими частицами, которые служили для физиков отправной точкой, считались атомы (существование которых тем не менее оспаривалось некоторыми учеными), и лишь недавно были открыты электроны. Тогда предполагалось, что размеры электронов не превышают 10^{-15}. Сейчас проводятся эксперименты, в которых исследуются частицы размером всего 10^{-19}, а теоретики уже озабочены поиском частиц размером 10^{-35}. Теперь мы можем «видеть» атомы отдельно от их ядер; многие достижения нашей промышленности и наше благосостояние основаны на открытии физических свойств электрона. Технологии, разрабатывае-

мые в научно-исследовательских лабораториях в процессе «чисто» научных изысканий, рано или поздно находят свое воплощение в новых отраслях промышленности и прикладных науках. Как считает физик Джон А. Уилер: «Мы живем на острове, окруженном морем невежества. И по мере роста нашего острова знаний также растет и береговая полоса нашего незнания». (Цитируется Джоном Хорганом в книге «Конец науки», Reading, Mass.: Little, Brown and Company, 1997.) Следовательно, всегда будут возникать вопросы, на которые нужно будет давать ответы. А когда мы задаем вопросы о Вселенной, то можем получить удивительные ответы. Как писал в своей книге «Возможные миры и другие заметки» (London: Chatto & Windus, 1927) Дж. Б. С. Холдейн, «я не сомневаюсь в том, что в действительности будущее сулит нам намного больше потрясений, чем я могу себе представить. Теперь у меня есть подозрения, что Вселенная не только более причудлива, чем мы предполагаем, но еще причудливее, чем мы можем даже вообразить».

Я также хочу изложить свои доводы против псевдонаучной болтовни, заблуждений нового века и безумия нового тысячелетия. Чтение астрологического прогноза в газете можно считать невинной забавой, но воспринимать это всерьез — значит отступать из зоны света в темноту. Галилео Галилей считал: «Философия записана в огромной книге, которая лежит перед нашими глазами, — я имею в виду Вселенную, но мы не сможем понять ее, если сначала не выучим язык и не поймем символы, с помощью которых она изложена». Чтобы оценить поэзию, необязательно быть поэтом; также необязательно быть физиком, чтобы восхищаться удивительной красотой открытий прошедшего века в области физики Вселенной, в которой мы живем. Но так же как вдумчивое чтение может обострить чувство наслаждения поэзией, так и с погружением в мир физики даже малейшее напряжение ума не остается невознагражденным. Наука является центром нашей культуры; так же, впрочем, как и призрачный мир воображения и фантазии.

Эта книга – не дань схоластике. Я старался быть точным, не делая при этом попыток затронуть все темы, которые поднимаются в современной научно-исследовательской литературе. Взамен этого я выбрал те из них, которые считаю наиболее интересными. Чтобы подчеркнуть достижения физической науки конца двадцатого века, я включил сюда главу с анализом уровня развития физики в 1900 году. Уже тогда те фундаментальные открытия, которые впоследствии приведут к развитию квантовой механики и к теории относительности, были не за горами. А вот что было действительно трудно себе представить, так это огромный контраст масштабов при сравнении самой малой величины (теперь изучаемой физикой частиц высокой энергии) и очень большой величины (область астрофизики и космологии) и те невероятные методы, которые используются современной физикой, для того чтобы продемонстрировать их взаимовлияние. Поэтому значительную часть книги я посвятил этим областям науки. Но это не значит, что вся физическая наука занимается этими крайними противоположностями — большая часть научных исследований ведется в промежуточной области, и о некоторых из них я упоминаю в главе 12.

Я получил большое удовольствие от многочисленных бесед с коллегами из Куин Мери, и всем им я крайне признателен. Особую благодарность мне хотелось бы выразить Бернарду Карру, Джиму Эмерсону, Джерому Гонтлетту, Питеру Кальмусу и Яну Персивалю за их ценные замечания по поводу содержания некоторых глав. Также выражаю благодарность Стиву Адамсу за его помощь при оформлении иллюстраций. Я часто пользовался материалами великолепных журналов «Физика сегодня» и «Мир физики», издаваемых соответственно Американским и Английским институтами физики, а также многое почерпнул из того огромного разнообразия информации, которая доступна в Интернете. В конце я привожу указатель имен с датами рождения и смерти, если это известно. Тревор Липском и Джо Висновски, мои редакторы в издательстве «Принстон Юниверсити Пресс», оказали мне большую помощь своей конструктивной критикой и поддержкой, что для каждого автора трудно переоценить.

По каждой теме я предложил список дополнительной литературы, но эти списки являются всего лишь малой частью большого перечня интересных книг, предназначенных для неспециалистов. Я надеялся сделать некоторые области физики, которые я считаю потрясающе интересными, доступными для обычного читателя. Я уверен, что физики обязаны объяснять простым людям, чем они занимаются в действительности. Исполняя эту обязанность, я старался не забывать афоризм великого русского физика Якова Зельдовича: если ты не можешь объяснить это студенту высшей школы, ты сам этого не понимаешь.

Джон М. Чарап
Лондон, август 2001 года

ПРИМЕЧАНИЕ К ЦИФРАМ

Хотя я добросовестно старался избегать математических выкладок в этой книге, без цифровых данных мне было бы трудно показать масштаб явлений, которые изучает физика. Из всех наук физика в большей степени, чем другие, имеет дело прежде всего с количественными и точными измерениями. Некоторые из основных физических величин были измерены с точностью до одной доли от квадриллиона, причем отдельные данные соответствуют тому, что с такой точностью предсказывает наука. Трудно даже вообразить, что означает такая точность — ее можно сопоставить с толщиной игральной карты по сравнению с расстоянием до Луны. Представляя очень большие или очень малые числа, намного удобнее использовать математическую систему исчисления, указывающую на степень числа 10. Согласно этой системе исчисления, 1 000 000 = 10^6, а квадриллион, или 1 000 000 000 000, равен 10^{12}. То есть миллион — это $10\times10\times10\times10\times10\times10$, или результат шестикратного умножения цифры 10, и таким же образом одна квадриллионная является результатом двенадцатикратного умножения цифры 10. Для очень малых величин используется такое же обозначение: одна миллионная пишется как 10^{-6}, что является результатом шестикратного деления единицы на 10. И так далее. Учитывая краткость обозначения, это облегчает сравнение между числами разной величины. Кроме точного определения релевантных величин, в физике очень много усилий затрачивается на определение последовательности величин. Например, в настоящее время население земного шара составляет около 6 млрд человек, или 6×10^9, и эта цифра увеличивается на четверть миллиона, или $2{,}5\times10^5$, каждый день. Это увеличение составляет около 90 млн (9×10^7) в год, что означает пропорциональное увеличение на $(9\times10^7) \div (6\times10^9) = 1{,}5 \times 10^{-2}$, или 1,5% каждый год. И эти цифры меня пугают!

ГЛАВА 1

ВВЕДЕНИЕ

Границы нашего знания

Открытия, сделанные физиками за последние 100 лет, и их использование в медицине, промышленности и быту преобразили нашу жизнь. Для нас стали обыденными вещи, которые вчера казались несбыточной мечтой. Фундаментальные исследования создали новые продукты и новые отрасли промышленности, а также способствовали более глубокому пониманию окружающего нас мира. Временной промежуток между каким-то научным открытием и его практическим применением все время уменьшается. Несмотря на все противоречивые обстоятельства, иногда сопутствующие этим достижениям, я считаю этот процесс весьма позитивным и многообещающим.

Представим себе беременную женщину, посещающую современную клинику. Положение младенца в утробе матери отображается на экране — ультразвуковое сканирование и компьютерный дисплей мгновенно выдают информацию акушеру и помогают будущей матери обрести чувство комфорта (рис. 1.1). Ее звонок домой, как и сотни других звонков, передается в виде лазерных импульсов по оптоволоконному кабелю толщиной тоньше человеческого волоса. Ребенок, отвечая на звонок, выключает телевизор — спутниковое телевещание, а позже звонит отцу. Он подходит к телефону, с удовольствием думая о том, что приготовленный им ужин можно будет подать на стол всего через несколько минут, разогрев его в микроволновой печи. А он тем временем сможет послушать компакт-диск с записью из концертного зала, воспроизводимой с помощью лазера, сканирующего микроскопические углубления в дешевом металлическом диске. Ничего особенного, и все же эта семья имеет в своем распоряжении удивительные устройства, которые всего лишь одно поколение назад показались бы фантастикой, и едва ли задумывается об этом факте.

В этой книге я хотел бы подробно рассказать о том, как физик представляет себе мир на заре двадцать первого века. Большинство из нас любит отмечать юбилейные даты, особенно когда речь идет о столетних юбилеях. Они дают возможность оглянуться назад, а также сделать прогнозы на будущее. Часто нам представляется удобным относить различные события к тому или иному веку, как бы фиксируя определенные вехи в бурном потоке жизни с интервалом в сто лет. Учитывая это, по счастливому стечению обстоятельств начало современной физики вполне можно связать с 1900 годом, когда Макс Планк открыл закон, который предвосхитил появление квантовой механики. Скорее консерватор, чем революционер, как по темпераменту, так и в отно-

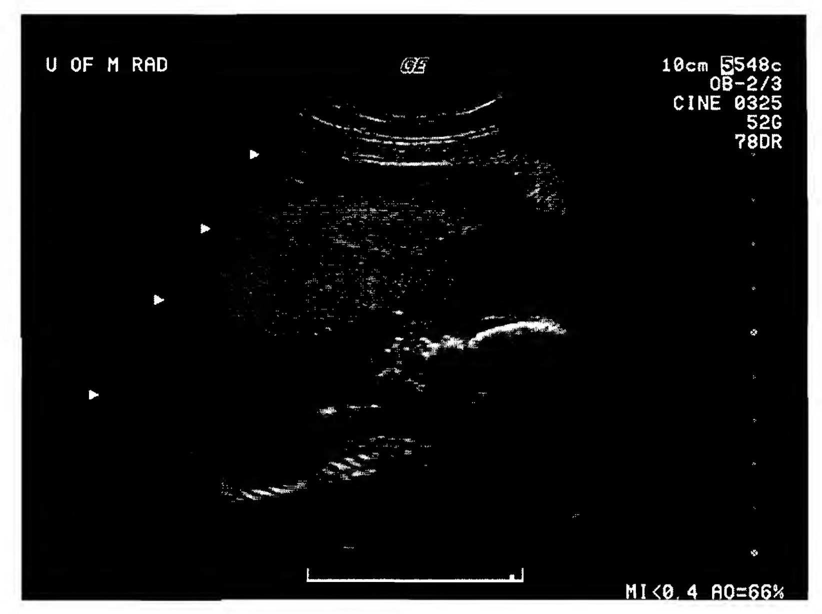


Рис. 1.1. Ультразвуковая фотография младенца в утробе. Ультразвуковое изображение является одним из достижений физики двадцатого века в области медицинской практики. Какие технологии предстоит увидеть этому младенцу в будущем? (С разрешения GE Medical Systems.)

шении своих исследований, он тем не менее хорошо понимал, что его открытие имеет величайшее значение. В конце девятнадцатого века были сделаны и другие фундаментальные открытия, например электрона и радиоактивности, которым также было суждено знаменовать собой то, что мы сегодня называем классической физикой.

Прежде чем приступить к перечислению некоторых удивительных достижений в области физики в двадцатом веке, следует сделать общий обзор, начиная с 1900 года. До сих пор еще живы люди, которые могут помнить, что было с ними сто лет назад; и для большинства из нас волшебные моменты прошедшей эпохи — пожелтевшие фотографии, старые кинофильмы, граммофонные пластинки, книги и журналы — помогают воскресить это прошлое, которое живо предстает перед нашими глазами. Некоторые вещи кажутся вечными и неизменными; другие навсегда остались в прошлом. Но больше всего изменений прошедшего века — больше, чем в быстро меняющемся мире моды и стиля, и даже больше, чем в области стремительно развивающихся технологий, — было связано с открытиями такого масштаба и значения, что мы с полным правом можем назвать их революционными. Эти открытия повлекли за собой глубокие изменения в нашем восприятии мира — в не меньшей степени, чем в науке в целом и в физике в частности.

Открытия в области физики имели такие далекоидущие последствия не только благодаря их техническому воплощению. Двадцатый век принес с собой глубокие изменения в нашем подходе к пониманию вселенной и тех законов, которые объясняют ее структуру и состав материи. Мы узнали, что

Млечный путь, звездная галактика, в которой наше Солнце является всего лишь одной из 100 млрд других звезд, сама является только одной из 100 млрд других галактик. Теперь известно, что вселенная не только невообразимо больше по размерам, чем было принято считать всего лишь в предыдущем поколении, но и существует гораздо больше времени. Доказательства ее появления во время «большого взрыва» и удивительное описание ее трансформации от ужасающего горнила со сжатой энергией до последующей конденсации материи в звезды, планеты и элементы, из которых мы и созданы, являются примерами триумфа человеческого интеллекта, и это перекликается с мифологией, что лишь подтверждает данные факты. В главе 3 я обращаюсь к открытиям прошлого века в области астрономии, которые так радикально изменили наше представление о мире, а также даю краткий обзор тех захватывающих перспектив, которые открываются благодаря новым видам телескопов, приближающим новые космические горизонты.

Удивительно, что материя при всем многообразии своих форм — от водорода, простейшего и наиболее распространенного элемента, до наиболее сложных молекул, таких как ДНК, в которой закодирована наша генетическая память, — состоит из атомов. Но как оказалось, сами атомы имеют структуру, которую невозможно описать или проанализировать без изменения основных представлений о механике, унаследованных нами от Галилея и Ньютона. Открытие этих новых законов механики — квантовой механики (тема главы 4) — стало одним из показательных революционных «сдвигов», которыми были отмечены успехи физики в двадцатом веке. Квантовая механика, необходимая для понимания структуры атомов, обеспечила прочную основу не только для развития химии, но также для ядерной физики и физики элементарных частиц, из которых состоит вся материя. И в настоящее время не прекращаются исследования, направленные на выявление дополнительных возможностей квантовой механики для понимания происхождения и общей структуры вселенной. Да и в самом принципе квантовой механики остаются еще загадки, которые необходимо разгадать. Мы хорошо знаем, как *использовать* квантовую механику, но до сих пор остается открытым вопрос о том, что она *представляет собой*. И это задача не только для кабинетных философов! Потому что между теорией информации и квантовой механикой существует удивительная взаимосвязь, которая дает основание предположить, что в ближайшем будущем мы сможем создавать квантовые компьютеры со скоростью операций, намного превосходящей скорость современных машин.

Однако отличительной особенностью физики является ее непредсказуемость, и причина этого не только в естественной неопределенности, привнесенной квантовой механикой. Даже в детерминистской парадигме механики Ньютона комплексные системы действуют довольно хаотично. Хаос — это не то же самое, что беспорядок. В хаосе существует порядок необычного свойства, и его закономерность описана в главе 5. Неупорядоченность и неоднородность хаотичных систем требуют нового подхода, более целостного, чем в классической механике. Наука о комплексности и спонтанном генерировании порядка самоорганизующимися системами имеет огромное значение для

биологии, экономики и социологии. Складывается впечатление, что жизнь возникает буквально из хаоса. Потому что именно там возникают сложные адаптивные системы, а каждое живое существо и любая экологическая среда представляют собой сложную адаптивную систему.

Еще одним примером трансформации классических представлений о мире, унаследованных от Ньютона с его богатой и плодотворной научной деятельностью, стали идеи, высказанные Эйнштейном в его теориях относительности, специальной и общей. Пространство и время — соответственно инертность и принцип упорядочения классической физики — были объединены специальной теорией в понятие пространства-времени, не подразумевающее каких-либо абсолютных ориентиров или предпочтительных систем отсчета. Затем понятие пространства-времени стало активно использоваться в рамках общей теории для объяснения материи и в то же время послужило основой для нового понимания наиболее известной нам природной силы — силы тяжести. Совмещение квантовой механики с теорией относительности потребовало определенной доли научной смелости, и даже сегодня полное слияние квантовой механики с общей теорией, а не просто с какой-то частной теорией считается довольно спекулятивным и спорным. Тем не менее не вызывает сомнения тот факт, что объединение специальной теории относительности с квантовой механикой стало основой для удивительно полного и подробного объяснения физики элементарных частиц и способов их взаимодействия, причем это объяснение достаточно убедительно, чтобы понять закономерность движения частиц как в лабораторных условиях изучения физики высоких энергий, так и в необъятном мире рождения и гибели звезд. В настоящее время мы можем только размышлять на тему истинного значения квантовой механики, объединенной с общей теорией относительности.

Эти размышления отличаются глубиной и удивительной результативностью. Они обогатили большинство теоретиков, работающих на переднем фланге физических исследований, знаниями о том, что основные космические объекты в большей степени напоминают струны, чем направленные частицы, что пространство-время имеет большие размеры, чем те, которые мы способны воспринять, исходя из нашего ежедневного опыта, что существуют глубокие взаимосвязи и симметрии, которые ограничивают возможную структуру пространства-времени и материи. Для некоторых эти идеи кажутся имеющими под собой оснований не больше, чем предположения древней философии или мистицизм нового века. Но я так не считаю! Я надеюсь, что мне удастся убедить вас в том, что они соответствуют жестким требованиям математической логики и даже еще более жестким требованиям соответствия экспериментальным наблюдениям. Эти научные предположения не только помогают нам представить потрясающую воображение картину мира, но также удивительным образом способствуют пониманию того, что этот воображаемый мир может быть тем местом, где мы реально живем!

В главе «Ваше место или мое» речь идет о частной теории относительности и об изменении нашего понимания элементарных частиц, вызванном объединением этой теории с квантовой механикой. Релятивистская кван-

товая механика привела к открытию антиматерии и признанию того факта, что частицы не могут быть постоянными и неизменными, как атомы в представлении древних греков, а скорее являются создаваемыми и разрушаемыми объектами. Благодаря этому пониманию возникла идея о том, что частицы лучше всего представлять в виде энергетических блоков, связанных с полями. Эта релятивистская квантовая теория полей, возможно, является отправной точкой в наиболее адекватном подходе к пониманию общей структуры материи и тех сил, которые воздействуют на нее. В главе 7 говорится о том, каким образом применение этой теории позволяет получить расчеты, поразительно точно совпадающие с результатами экспериментов в области физики частиц высокой энергии. Квантовая теория полей также является базой для так называемой стандартной модели физики субатомных частиц — главной темы обсуждения в главе 8.

Все сведения о разработках, ставших следствием общей теории относительности Эйнштейна, я оставил для главы 9. В главе 10 «Струны» я в общих чертах описал быстро развивающуюся теорию, которая впервые позволила нам соотнести квантовую механику с общей теорией относительности и которая в будущем имеет все основания называться «Всеобщей теорией». Квантовая механика необходима для объяснения того, что происходит в крошечном мире атома и его составляющих. Общая теория относительности нужна для расширения теории тяготения Ньютона с целью ее применения в исследовании экстремальных условий возникновения черных дыр и огромного пространства вселенной в целом. Сегодня квантовая теория тяготения нам нужна для того, чтобы описать самые первые моменты после большого взрыва, с которого началась история вселенной, и найти доказательства этого в космическом пространстве. Поиски такой теории являются предметом озабоченности современной космологии и темой главы 11.

Конечно, современная физика — это больше, чем теоретические исследования и эксперименты и терпеливое наблюдение за этими явлениями в диаметрально противоположных масштабах — от микромира физики частиц до макромира космологии. Очень многое мы также узнали и о промежуточных областях, о более привычных условиях нашей повседневной жизни. Многие технические достижения, которые сделали возможным появление новой физики, также обогатили нашу жизнь, связав тем самым понятия природы и практической деятельности человека. На заре двадцатого века открытие рентгеновских лучей — новшество тех времен — уже создало основу для совершенно нового подхода к медицине, подхода, правильность которого была подкреплена последующими успехами в области физики, что в дальнейшем обусловило появление СТ- и MRI-сканеров, ультразвука и других безвредных для человека диагностических устройств. Достижения в области терапии подразумевают лазерную хирургию, радиотерапию и циклотронные лучи для лечения рака, а также целый спектр электронных устройств для мониторинга, которые преобразовали систему ухода за больными. И во многом это были нововведения, явившиеся следствием революции в электронике, которая оказала глубочайшее влияние на нашу жизнь. Транзисторы, лазеры, микроволны

и оптические волокна — все это достижения физики двадцатого века, которые изменили наш способ коммуникации, досуг и промышленность. В древности некоторые технологии вводились в действие без какой-либо научной базы — лишь на основании опыта тех, кто их использовал. Но большая часть современных технологий нашла практическое применение благодаря научным открытиям и разрабатывалась в научных лабораториях благодаря изобретательности ученых-исследователей. Целые отрасли промышленности создавались с помощью техники и технологических процедур, которые возникли в результате исследований, мотивированных поисками знаний ради них самих.

Физика наступает по всем фронтам. Физика частиц высокой энергии и астрофизика, какой бы романтический ореол и популярность их ни окружали, не являются единственными областями открытий и потрясений. Даже если мы можем со всем основанием претендовать на знание фундаментальных законов, управляющих движением материи в ситуациях менее экстремальных, чем в условиях высоких энергий в лабораториях или с учетом физических границ пространства и времени, из этого не следует, что мы полностью понимаем смысл этих законов. А иногда, хотя и редко, новые открытия требуют того, чтобы эти законы были пересмотрены. Гораздо чаще от нас требуют объяснить открытие в рамках уже известных нам законов.

Приведу пример. Со времени своего назначения директором лаборатории в Лейдене (Нидерланды) в 1882 году Камерлинг Оннес стремился раздвинуть границы экспериментальной физики: он пытался приблизить температуру к абсолютному нулю. Он был первым, кто получил жидкий гелий. И в результате систематического изучения оптических, магнитных и электрических свойств субстанций при низких температурах он открыл, что электрическое сопротивление свинца неожиданно полностью исчезает при температуре всего 7,2 градуса выше абсолютного нуля. Он открыл свойство сверхпроводимости. В 1956 году, была найдена адекватная теория, объясняющая это явление. Но теория не требует пересмотра законов; она скорее является их предполагаемой формой. Сверхпроводники широко используются — например, в магнитах для MRI-сканеров в больницах.

История на этом не заканчивается, так как было обнаружено, что некоторые керамические материалы при охлаждении в течение короткого времени жидким азотом[4] также теряют способность к электрическому сопротивлению. До сих пор не найдена приемлемая теория, объясняющая эту закономерность (теория, которая может объяснить сверхпроводимость металлов, таких как свинец, охлажденных до гораздо более низкой температуры, чем это возможно для жидкого гелия, не подходит для этих «высокотемпературных» сверхпроводников). Однако никто не задумывается о том, что для этого потребуется ревизия законов, управляющих атомной и молекулярной структурой, а еще меньше внимания уделяется законам квантовой механики и электромагнитной теории, являющимся их фундаментом. И хотя у нас нет теории, чтобы объяснить данное свойство, керамические сверхпроводники уже используются в технике.

Физика как наука представляет собой многослойную структуру, которая характерна и для других наук. Можно предположить, что на самом глубинном,

базовом, уровне действуют фундаментальные законы и принципы, которые управляют всеми бесчисленными явлениями физического мира. Но было бы неразумно и бесполезно брать за основу эти общие принципы при объяснении каждого феномена, наблюдаемого в лаборатории или в нашей повседневной жизни. Заключенные в формулы, общие и фундаментальные законы и их комплексное, специфическое и практическое использование могут сильно отличаться. Однако по мере нашего продвижения от уровней объяснения и теории к эксперименту крайне необходимо, чтобы ни на одном из этих этапов у нас не возникало противоречий с теми выводами, к которым мы можем прийти на более низких уровнях. На любом уровне объяснения часто бывает полезно использовать те законы, которые можно было бы назвать вспомогательными или второстепенными, но уместными на данном этапе и включающими в себя в более удобном для применения виде выжимки из законов, установленных на более низких уровнях. С помощью такой методики фармаколог может, например, составить лекарство на основании эмпирических знаний о структуре молекул, полученных на базовом уровне химии; в свою очередь, эти молекулы анализируются в рамках теории, основанной на изменении электронов и атомных ядер, что объясняет квантовая механика и теория электромагнетизма. Но даже теория квантовой электродинамики является приблизительной, хотя и эффективной, теорией, основанной на более глубоком уровне понимания (рис. 1.2).

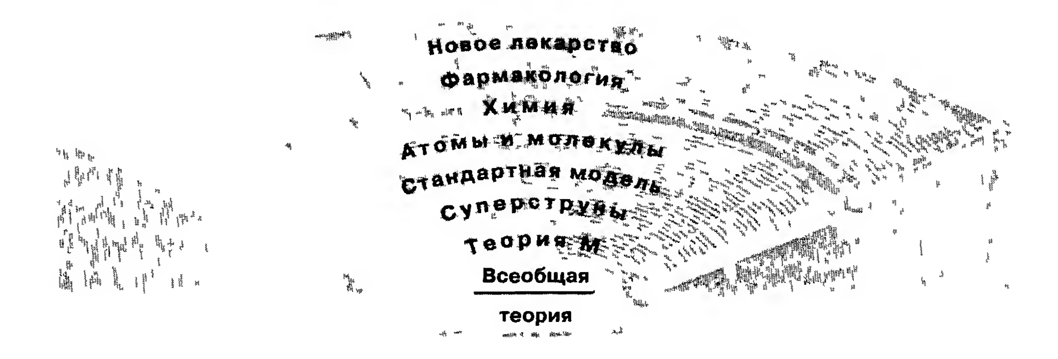


Рис. 1.2. Иерархия, связывающая основные законы природы с их практическим использованием. Необходимо проделать большой путь от всеобщей теории до получения нового лекарства

Возможность проследить этапы понимания от начального уровня до более глубокого связана с *редукционистским* подходом к науке, который является источником некоторой путаницы и противоречий даже в рамках самой науки. Стивен Уайнберг в работе «Мечты о конечной теории» (Нью-Йорк, N.Y.: Vintage Books,1994) пишет о «тех оппонентах редукционизма, которых ужасает то, что, по их мнению, является незащищенностью современной науки. Насколько могут быть редуцированы они и их мир – до частицы или полей и их взаимосвязей, настолько они чувствуют себя униженными этим знанием. <...>Редукционистский взгляд на мир холоден и безличен. Его следует принимать таким, какой

он есть, не потому, что он нам нравится, но потому, что так устроен мир». А тем «ученым, которые приходят в ярость, когда слышат, что их отрасли науки опираются на более фундаментальные законы физики элементарных частиц», он отвечает: «Полезны или нет открытия физики элементарных частиц всем другим ученым, *принципы* этой физики лежат в основе всей природы».

Нельзя ни игнорировать, ни преуменьшать трудности движения наверх через все эти пласты уровней понимания. На каждом этапе может оказаться не только удобным, но и необходимым введение новых законов, новых структур, новых методов описания, чтобы лучше объяснить те явления, с которыми приходится сталкиваться на этом пути. Было бы не только самонадеянно, но и глупо пытаться получить лекарство, начав с квантовой электродинамики! Проблемы фармакологии являются комплексными и специфическими; на более глубоком уровне действуют простые, общие принципы квантовой электродинамики. Примечательно то, что результаты применения этих общих принципов могут быть необычайно плодотворными и разнообразными. Можно сказать, что квантовая электродинамика объясняет особенности химических элементов, но удивительные и уникальные свойства углерода, которые делают его основой для химической составляющей всего живого, со всей определенностью можно назвать *развивающимися*. Это похоже на дуб, во всей его сложности, вырастающий из такой элементарной субстанции, как желудь. Однако здесь есть существенное отличие. То, что возникает из желудя, всегда будет дубом и никогда — зеброй. Все огромное разнообразие тех сложных явлений, которые восхищают и озадачивают нас, можно объяснить теми основными законами, которые физики так стремятся открыть.

Редукционист может пытаться вывести фундаментальные законы, имеющие отношение к свойствам частиц и полей, которые, естественно, более универсальны, чем свойства дубов или зебр. Однако нельзя отрицать того, что уже открыты важнейшие, иногда парадоксальные, законы и нормы, например, в генетике, которые являются определяющими для понимания биологии. Дело в том, что они являются в некотором смысле следствиями изучения химического состава ДНК и в конечном счете физики элементарных частиц. Было бы неразумно стремиться исследовать дубы и зебр, которые, с одной стороны, так похожи, а с другой — такие разные, путем изучения физики элементарных частиц. Химический состав ДНК и вытекающие из него законы биологии, можно сказать, *основываются* на более глубоком уровне знания физики атомов и молекул. В рамках самой физики мы имеем дело с *постоянно меняющимися* явлениями. Воздух в вашей комнате состоит из молекул, которые сталкиваются и отталкиваются друг от друга, как это хорошо описано в механике. Когда молекулы сталкиваются, энергия, возникающая при их движении, распределяется между ними, а средняя кинетическая энергия представляет собой то, что мы называем «температурой». Следовательно, температура воздуха является следствием молекулярной динамики. Однако бессмысленно говорить о температуре одной молекулы и даже полдюжины молекул. Температура — это *постоянно меняющийся* феномен, который становится заметным только тогда, когда в нем задействовано большое количество молекул.

К сожалению, редукционистский подход может привести к неправильным выводам, которые отталкивают людей от науки в целом и от физики в частности в пользу более удобных холистических представлений нового века. По мере продвижения снизу вверх, сквозь различные пласты явлений к еще более сложным системам, не стоит удивляться тому, что мы столкнемся с интересными и важными вопросами, на которые невозможно найти простые ответы, пользуясь уже известными понятиями. В прошлом мистицизм и магия действительно питали нашу культуру, и сама наука должна без всякого смущения признать, что ее корни уходят в эту специфическую почву. Однако наука и ее составляющие являются более надежными и эффективными помощниками для решения насущных проблем, с которыми мы сталкиваемся, чем туманные объяснения и суеверия. Сложные проблемы всегда имеют сложные решения, и, конечно же, это больше ассоциируется с лесом, чем с неким количеством деревьев. Но я уверен, что лес как единое целое можно лучше исследовать, оценив для начала отдельные деревья.

Более 80% когда-либо живших ученых работают в наше время. Частота научных открытий увеличилась, и вместе с этим возросли преимущества, которые может дать наука, а вместе с ними — необходимость гарантии того, чтобы эти преимущества перевешивали количество зла и несчастий, сопутствующих использованию научных знаний. Я думаю, что наступило время оглянуться на достижения прошлого (и безумства), которые мы так часто принимаем как должное. К тому же сейчас благоприятный момент, чтобы критически оценить текущее состояние физического мира. Оглядываясь назад, мы видим, что уже на заре двадцатого века появились предвестники революционных изменений, которые должны были произойти в нашем понимании физического мира — изменений, которые доказали необходимость тщательного анализа открытий, сделанных в процессе опытов и наблюдений. Нам пришлось переосмыслить принципы элегантной, но упрощенной классической физики, но они до сих пор служат надежной основой для физики двадцать первого века, обеспечивая при этом контекст и даже большую часть терминов, с помощью которых разрабатывается та или иная тема. Я не верю в то, что мы находимся в конце пути. Я не верю, что современный релятивистский взгляд на квантовую механику, даже учитывающий такие теории, как теория струн, является окончательным словом в науке. Но я также не верю и в то, что нам когда-нибудь придется полностью отказаться от теоретической конструкции, в создание которой мы вложили столько труда и интеллектуальных затрат и в рамки которой мы можем уместить обширные и многогранные знания как результат наших экспериментов. Наука зиждется на постоянном чередовании объяснения и наблюдения. Я убежден, что по мере того, как наука будет создавать новые технологии и новую технику, появятся новые феномены, которые выйдут за рамки наших современных теорий. И мы должны приветствовать подобные явления и пользоваться их результатами. Ведь для науки они могут стать стимулами для более глубокого понимания сути вещей и дальнейшего движения вперед.

В следующих главах я попытаюсь изобразить физический мир таким, каким он представляется в наше время. Революции, которые произвели в науке теории относительности и квантовая механика, имели глубокий смысл и обозначили проблемы, которые все еще ждут своего решения. Однако сегодня теория относительности и квантовая механика уже глубоко встроены в ту условную модель реальности, которую я исследую как физик и которую попытаюсь здесь описать. Вчерашняя революция сегодня уже являет собой непреложную истину, а я придерживаюсь общепринятых взглядов, которые достаточно консервативны и, я уверен, имеют широкую поддержку. Тем не менее, когда я заглядываю в будущее, научные перспективы вызывают у меня живой интерес и манят своими непознанными тайнами.

ГЛАВА 2

ФИЗИКА В 1900 ГОДУ

Взгляд из прошлого

Какие темы были самыми актуальными в 1900 году? В том году, выступая на собрании Британской ассоциации за прогресс в науке, Джозеф Лармор (рис. 2.1) начал свой президентский доклад с обращения к представителям математиков и физиков, сделав особый акцент на успехах предыдущих двадцати лет в исследовании электричества и свойств магнита и при этом добавив: «В наше время во взаимосвязях цивилизованной жизни произошли, возможно, более глубокие изменения, чем это случалось когда-либо прежде, благодаря установлению практически мгновенной электрической связи между всеми частями света». Шотландский физик Джеймс Кларк Максвелл предсказал открытие электромагнитных волн и дал определение света как проявление этих волн на физическом уровне. Но какая субстанция выступает в роли их носителя? Лармор поинтересовался, не является ли этим носителем «просто неосязаемая материальная среда, которая передает энергию в виде излучения» или скорее «истинная сущность всех физических процессов» (Nature 62 [1900]: 449 et seq). Эта полемика о природе «эфира» подняла один из центральных вопросов, обсуждаемых в среде физиков.

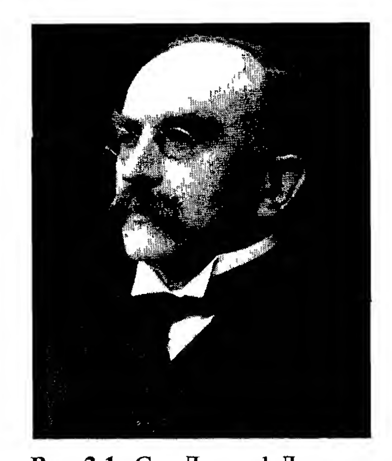


Рис. 2.1. Сэр Джозеф Лармор руководил Люкасовской кафедрой математики в Кембриджском университете. Среди тех, кто возглавлял эту кафедру до него, были сэр Исаак Ньютон и Чарльз Беббидж, а среди тех, кто пришел за ним, — Поль Дирак и Стивен Хокинг. (© Emilio Segrè Visual Archives, The American Institute of Physics.)

Лармор не прекращал уделять внимание успехам в исследовании свойств электрических разрядов в газовых средах и особенно исследовании катодных лучей. (На ежегодном собрании Американской ассоциации по развитию науки в 1900 году вице-президент Эрнст Джордж Мерритт также подчеркнул особую важность изучения свойств катодных лучей.) Тремя годами ранее эти исследования привели Дж. Дж. Томсона к открытию электрона как элементарной частицы материи. Это, в свою очередь, вызвало широкие дискуссии по поводу структуры атомов. Однако, по мнению Лармора, «исчерпывающие

знания о внутренней природе атома выходят за пределы современной физики». Тем не менее размышления на тему физики атомов заняло большую часть его выступления.

Комментируя дискуссии о природе эфира и атома, Лармор не догадывался, что он определил две области будущих исследований, которые позже приведут к радикальному пересмотру основных законов физики.

По прошествии стольких лет трудно представить себе ту одержимость, с которой физики — и химики — обсуждали свойства атомов и молекул. Считать ли природу материи, представленной в виде частиц, реальностью или просто «обычной выдумкой», которой можно прикрыться при толковании результатов эксперимента? Даже на рубеже двадцатого века еще были слышны голоса некоторых научных авторитетов, выступавших против атомистической модели, особенно это относилось к Фредерику Оствальду и Эрнсту Маху. Но их взгляды были опровергнуты полученными в лабораториях данными, которые перепроверялись и анализировались в течение десятилетий до и после 1900 года. Необходимо отметить, что одним из решающих шагов для подтверждения реального существования атомов стали идеи Альберта Эйнштейна, изложенные им в его докторской диссертации 1905 года и детально разработанные в последующих публикациях. Интересно, что идеи Маха по механике и природе инерции оказали на Эйнштейна глубокое влияние и именно Оствальд первым предложил кандидатуру Эйнштейна для его выдвижения на Нобелевскую премию.

Девятнадцатый век отмечен бурным развитием физики электромагнетизма. Изобретение в начале века химической батареи итальянским графом Алессандро Вольта положило начало многолетней эпохе открытий, связанных с электричеством, причем этот прогресс стал возможным благодаря доступности источников электрического тока. Связь между электричеством и магнетизмом была обнаружена благодаря опытам, которые наряду с другими учеными проводили Андре-Мари Ампер и Георг Ом, как и Вольт, создавшие электроустройства, названные в их честь[4]. Эти опыты заложили фундамент для важнейших исследований самого замечательного экспериментатора — Майкла Фарадея. Он был протеже сэра Хамфри Дейви в Королевском институте в Лондоне. Сначала он работал в интересах самого Дейви в области химии, сделав важные открытия по части электролиза. Но к середине 1830-х занялся своими собственными исследованиями, которые привели его к открытию электромагнитной индукции, являющейся основным принципом работы генератора постоянного тока. Говорят, что, когда г-н Гладстоун, канцлер казначейства, спросил Фарадея о практической ценности электричества, тот ответил: «Однажды, сэр, вы обложите его налогом». Вместе с изобретением электродвигателя американцем Джозефом Генри в 1831 г. динамомашина Фарадея положила начало развитию электротехнической промышленности, которой предстояло вскоре преобразовать сферу связи, транспорта и производства. А в конце века электрические лампочки уже освещали дома и улицы.

Фарадей, возможно, был самым гениальным экспериментатором всех времен. Он также обладал способностью глубоко проникать в природу иссле-

дуемого им электричества и магнитных явлений, используя свое воображение, которое позволяло ему давать яркие и живописные формулировки универсальных законов, которые он открывал. По его мнению, пространство представляет собой всепроникающий эфир, пронизанный силовыми лучами, выступающими в качестве проводников магнитного влияния и участвующими в передаче электрического воздействия одного заряда на другой. Но именно Максвелл придал этим идеям законченное математическое выражение, и, теоретически обосновав связь электрического тока с ассоциируемыми изменяющимися электрическими полями, даже в пустом пространстве, он получил доказательство высшего синтеза электричества и магнетизма. Уравнения Максвелла (1865) являются великим итогом этого синтеза; вытекающие из них следствия просто поразительны. Максвелл сразу понял, что электрические и магнитные возмущения распространяются в пространстве с ограниченной скоростью, к тому же колеблющееся электрическое поле создает колеблющееся магнитное поле, и наоборот, что позволяет самостоятельной электромагнитной волне развертываться в пространстве. Он определил скорость ее движения. Как оказалось, она была равна скорости света. Он сразу понял: это значит — что свет нужно воспринимать как электромагнитное явление. Но только в 1887 году Генрих Герц смог проверить предсказание по поводу распространения электромагнитных волн, а в конце века Гульельмо Маркони использовал догадки теоретика в изобретенном им устройстве и в декабре 1901 года принял в Сент-Джонсе (Ньюфаундленд) сигналы из Полду (Корнуолл, Англия), передаваемые через Атлантический океан.

Унификация Максвеллом электричества, магнетизма и света было первым большим шагом на пути к далеким горизонтам, которые сегодня уже приблизились к нам: это объединение всех основных видов энергий и всех наиболее распространенных типов материи в одну универсальную теорию.

Волновая природа света была выявлена еще в начале девятнадцатого века и затем подтверждена многочисленными экспериментальными разработками, особенно при появлении интерферометрии — наиболее точного способа исследования оптических свойств. В интерферометрии используется характерное свойство волн, которое состоит в том, что при столкновении двух или более волновых возмущений проявляется эффект интерференции, при котором в одном месте волны усиливают одна другую, а в другом гасят друг друга, подобно ряби на водной поверхности водоема (рис. 2.2). Следовательно, волновой характер света сам по себе не был явным предсказанием теории Максвелла. Однако загадка не была разгадана, и со временем эта проблема становилась все более актуальной. Максвелл связал скорость света в незаполненном пространстве с основными электрическими и магнитными постоянными. Но скорость света относительно чего? Эфира? В начале века французский физик Арман Физо доказал, что скорость света в воде меньше, чем в воздухе, — в точном соответствии с требованиями волновой теории. Но он также показал, что она является разной в движущейся и в стоячей воде и зависит от того, был ли направлен свет вдоль течения или против потока воды.

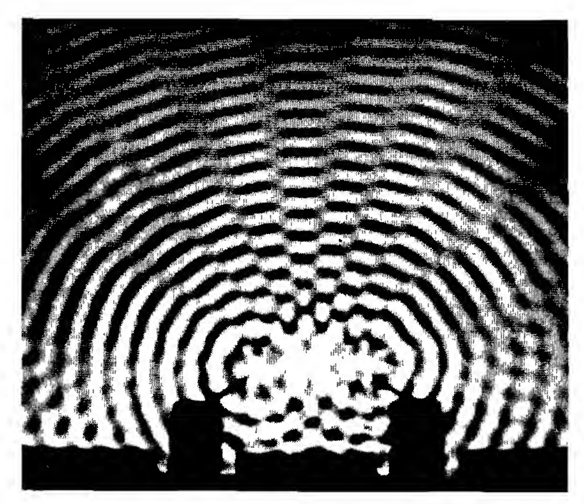


Рис. 2.2. Рябь на поверхности воды. Она иллюстрирует эффект интерференции, характерной для волнового эффекта. (Из «Физики», Physics, Physical Sciences Study Committee. D.C. Heath, Boston (1960).)

Само по себе это свойство не вызывает удивления: если вы идете по проходу в движущемся поезде, ваша скорость относительно пути зависит от того, направляетесь ли вы в головной или в хвостовой конец поезда. Такой же эффект можно ожидать при прохождении света сквозь текущую воду. А что происходит со светом, проходящим сквозь эфир? Земля движется вокруг Солнца со скоростью около 30 км/сек, поэтому любой земной аппарат пройдет сквозь эфир с достаточной скоростью, чтобы возникло значительное различие между скоростью света, измеренной в направлении движения Земли, и скоростью, направленной под прямым углом к траектории этого движения. Поразительно, но эта разница отсутствовала как во время оригинальных экспериментов, проведенных Альбертом Майклсоном (первым американским физиком, получившим Нобелевскую премию), так и в процессе более поздних и более изощренных опытов, проведенных им и Эдвардом Морли в 1887 году Решение этой загадки приведет в двадцатом веке к одной из величайших революций в физике — появлению теории относительности, о которой мы поговорим в главах 6 и 9.

Электричество и магнетизм были не единственными научными проблемами, о которых упомянул Лармор. В своем обращении к Британской ассоциации он также скептически отозвался о методах статистической механики, которые позволяют получать результаты анализа свойств основной массы материи на базе статистических характеристик составляющих ее атомов и молекул. В этом вопросе он оказался менее проницательным. Статистические методы уже использовались в кинетической теории газов, разработанной Рудольфом Клозиусом, Максвеллом и Людвигом Болтсманном. Этот метод имел большой успех, способствуя более глубокому пониманию и распространению законов термодинамики, сформулированных французским военным инженером, физиком и математиком Сади Карно, который руководствовался самой банальной, практической задачей — повысить КПД паровых

двигателей. В конце девятнадцатого века принципы статистической механики были использованы при исследовании радиации. В частности, фокус внимания сосредоточился на так называемом излучении «черного тела». Всем нам известно, что, железо, например, при нагревании начинает раскаляться и светиться сначала тускло-красным, а затем ярким белым цветом. Что обусловливает интенсивность (яркость) и цвет излучаемого света? Можно доказать, что совершенно черное тело, то есть такое, которое может поглощать любые цвета источника света, не рассеивая или не отражая его, также излучает свет в соответствии с температурой этого тела, но независимо от его состава. Поэтому проблему можно было свести к простому рассмотрению интенсивности и цвета этого света, излучаемого идеальным черным телом. Поскольку это следовало представить просто как некое свойство температуры, перед термофизикой встала задача разработать соответствующую теорию. Белый свет на самом деле состоит из всех цветов радуги, поэтому требуется всего лишь определить интенсивность излучения каждого цвета[5].

С помощью данных, полученных от термодинамики, было доказано, что существует одна-единственная математическая функция, зависимая только от одной переменной, которая может показать, что интенсивность излучения каждого цвета зависит от температуры. Но вывести эту функцию даже большой группе талантливых теоретиков до сих пор никак не удавалось. Как было сказано на том же собрании Британской ассоциации: «Исследования, теоретические и экспериментальные, направленные на поиск формы этой функции... являются, возможно, самой фундаментальной и интересной проблемой, выделяющейся в настоящее время в рамках общей теории связи излучения с температурой»[6].

Решение этой проблемы, найденное через некоторое время (в том же году) Максом Планком, стало началом еще одной революции, потрясшей основы физики. Она называется «квантовая теория».

В тот период были совершены и другие открытия, которые вызвали ожесточенные споры. В ноябре 1895 года Вильгельм Рентген в своей лаборатории в Вурцбурге исследовал характеристики электрической проводимости газа при низком давлении. К своему удивлению, Рентген увидел, что экран с покрытием из платиноцианида бария, находящийся в дальнем углу комнаты, светился, когда он пропускал ток через свой аппарат. Тщательно исследовав этот случайно обнаруженный феномен, он открыл рентгеновские лучи, за что в 1901году получил самую первую Нобелевскую премию по физике. Один из тех, кому Рентген послал экземпляр доклада о своих открытиях, был французский физик Анри Бекерель. Рентгеновское излучение, по-видимому, шло от флуоресцентного пятна в том месте на стенке стеклянной трубки, куда падал электронный луч. Бекерель, обладавший обширными знаниями о флуоресцентных кристаллах, стремился найти кристаллический источник излучения, подобного рентгеновским лучам. И снова случайность сыграла особую роль в очередном величайшем открытии — наряду с научной проницательностью и тщательностью исследования. А то, что в марте 1896 года, всего пять месяцев спустя после Рентгена, открыл Бекерель, было не новым источником рентге-

новских лучей, а совершенно иным видом излучения. Он столкнулся с радиоактивностью и тем самым заложил основы новой науки — ядерной физики. К 1898 году Эрнест Резерфорд из Новой Зеландии, защитивший диссертацию в 1851 году и работающий под руководством Дж. Дж.Томсона в лаборатории Кавендиша в Кембридже, обнаружил, что уран излучает по меньшей мере два разных вида лучей, которые он назвал «альфа» и «бета» (о наличии гамма-излучения в 1900 году объявил француз Поль Виллар)[7]. Цепочка великих открытий на этом не закончилась, так как Мария Складовска-Кюри и ее муж Пьер вскоре приступили к своему героическому исследованию источника лучей Бекереля, а к 1898 году уже открыли новые элементы — полоний и радий. Они основали еще одну новую науку — ядерную химию.

Открытия Томсона, Рентгена, Бекереля и многих других в совокупности стали результатом исследований электрических разрядов в газовой среде при низком давлении. Красивые, светящиеся, разноцветные электрические разряды, получаемые в таких вакуумных трубках, были не только объектом изучения для физиков в их лабораториях, но также способом развлечения в гостиных для любителей-энтузиастов. Неоновая реклама и люминесцентные лампы, которые мы теперь воспринимаем как обыденные вещи, возникли благодаря этой технологии девятнадцатого века. А изобретения Генриха Гейслера в середине этого же века были обусловлены свойствами высоковакуумных насосов и выявленной возможностью герметически запаивать металлические электроды в стенках стеклянных трубок. Трубка Гейслера сама по себе не представляет особого научного интереса, но многие великие научные открытия были бы невозможны без изобретений этого одаренного стеклодува (рис. 2.3).

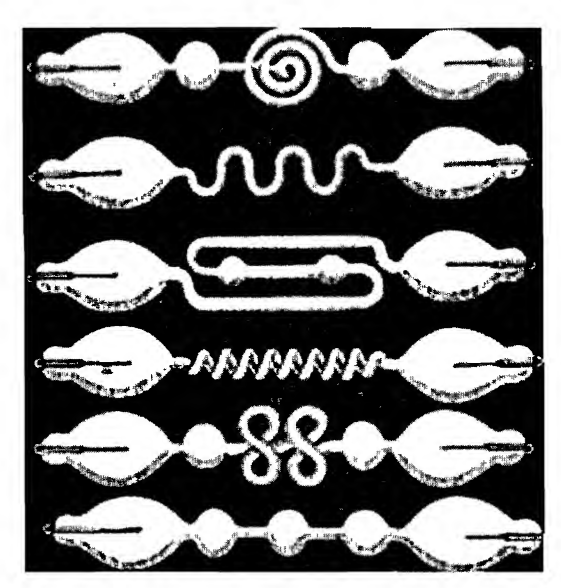


Рис. 2.3. Образцы некоторых трубок Гейслера, представленные в каталоге фирмы Chicago Laboratory Supply and Company, поставляющей физические, химические и биологические приборы для использования в лабораториях колледжей, школ и производственных компаний



Рис. 2.4. Сэр Исаак Ньютон. (Репродукция портрета кисти Мюррея — с разрешения Master and Fellows of Trinity College, Кембридж.)

Еще одним технологическим прорывом, подтвердившим великие открытия девятнадцатого века, последствия которого до нынешнего времени имеют огромное значение для лабораторной физики, стало использование дифракционных решеток в спектроскопии. Еще Ньютон (рис. 2.4) наблюдал за тем, как стеклянная призма рассеивает белый свет, чтобы получить спектр, содержащий все цвета радуги. Использование дифракционных решеток (глубоко прочерченные линии на отражающей поверхности или на тонкой стеклянной пластине) для анализа спектров были введены Джозефом фон Фраунгофером, приступившим к исследованиям примерно в 1821 году Он тщательно изучил темные линии, которые теперь называются его именем, и объяснил их появление — в строго сфокусированном спектре света по отношению к Солнцу (цветная иллюстрация 1). (Ранее их наблюдал Уильям Уоллестон.) Темные линии в спектре соответствуют свету, поглощенному из белого солнечного света, они также имеют своих двойников на ярких линиях в спектре света, излучаемого химическими веществами, подвергшимися тепловой обработке. Яркий желтый цвет, которым обычная соль окрашивает пламя газовой плиты, является наиболее известной иллюстрацией этого явления. Соль является хлоридом натрия, а заметная ярко-желтая линия в спектре говорит о присутствии натрия.

Над возможностью использования этих идей в спектроскопическом химическом анализе работал главным образом Густав Кирхгоф. Подобно химическому составу отпечатка пальца, рисунок линий в спектре показывает присутствие химических элементов там, где происходит излучение или по-

глощение света. И так же, как судебные эксперты могут брать отпечатки пальцев для идентификации тех, кто был на месте преступления, ученые могут использовать линии спектра, чтобы выявить химические элементы, участвующие в этом процессе, и даже открыть новые. В 1868 году сэр Джозеф Локьер использовал спектроскоп, приспособленный к телескопу, чтобы получить спектр солнечного света. Он обнаружил желтую линию, не связанную ни с одним из известных в то время химических элементов, и сделал заключение о существовании на солнце ранее неизвестного элемента, который он назвал гелием, от греческого слова helios, что значит «солнце». Только в 1985 году гелий был выделен сэром Уильямом Рамсеем в процессе «эманации» урана (газ, выделяемый, как мы теперь знаем, при радиоактивном распаде.)

Точность решетчатой спектроскопии требует безошибочного вычерчивания линий, и значительный прогресс в этой области был достигнут благодаря изобретению Генри А. Роландом из Университета Джона Хопкинса, что в Балтиморе, линовальной машины, которая к 1882 году могла чертить решетки плотностью 43,000 лин./дюйм (рис. 2.5)[8].

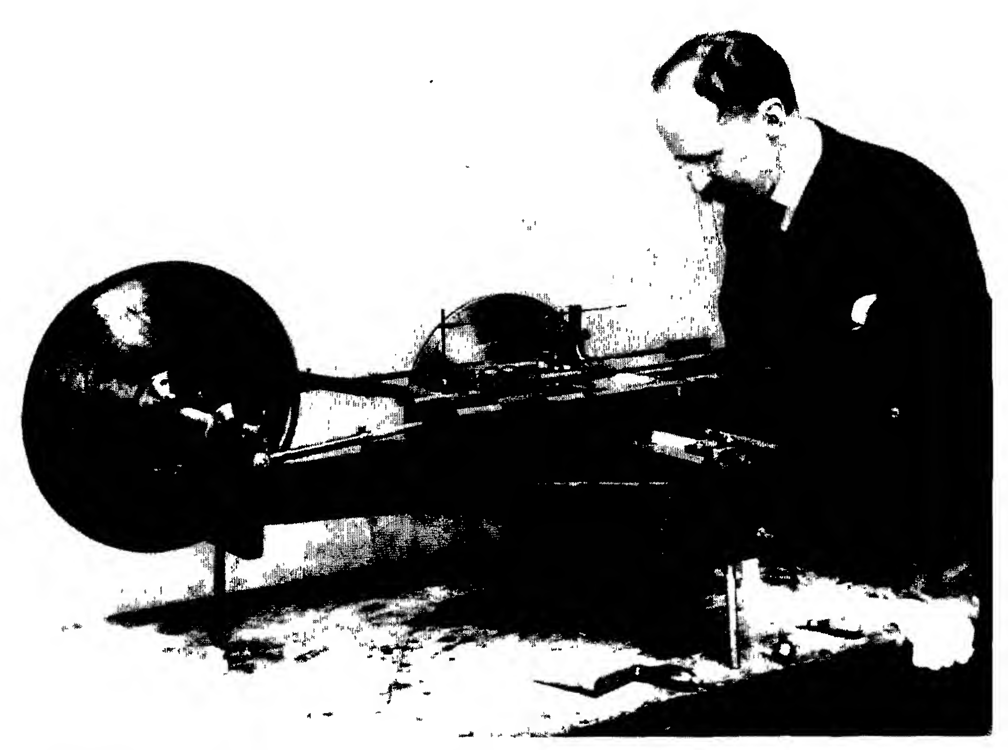


Рис. 2.5. Генри Роланд и его линовальная машина. (Фердинанд Гамбургер Дж., архивы Университета Джона Хопкинса.)

Решетки поставили спектроскопию и смежные ей интерферометрические методы в оптике в ряд наиболее точных технических средств в науке. И как доказано на примере практического применения гелия, спектроскопические исследования в их приложении к астрономии могут способствовать получе-

нию точной информации о свойствах астрономических объектов непосредственно из световых лучей, которые мы получаем от них. Современная наука астрофизика возникла в результате таких наблюдений.

Еще раз обратимся к речи Лармора. Ее философской основой была идея, связанная с теоретическими разработками в механике, в частности переформулировка законов превращения Ньютона, встроенных в аналитическую механику, которая была окончательно оформлена как наука ирландским ученым сэром Уильямом Гамильтоном и немецким математиком Карлом Якоби[9]. Ньютон формулировал свои законы, исходя из свойств частиц, на которые воздействуют различные силы; его уравнения отражают изменения в движении частиц, вызванные действием этих сил. Для сложных механических систем, состоящих из множества частиц, использование этих уравнений напрямую весьма затруднительно, поэтому восемнадцатый и девятнадцатый века стали эпохой изобретения очень эффективных методов, обеспечивших возможность более удобного подхода.

Оказывается, уравнения, связанные с движением, которые вытекают из законов Ньютона, можно также получить, используя только одну величину, состоящую из энергии частиц и сил их взаимодействия, и заявляя, что эта величина находится в экстремуме (лат. extremum — крайний)[10]. Это можно сравнить со способом определения формы эластичной ленты, натянутой вокруг трех колышков на доске и представляющей собой треугольник с прямыми сторонами, или расчета силы натяжения каждого маленького отрезка эластика, или, что намного проще, можно исходить лишь из того, что реальная форма имеет наименьшую длину. Величина, используемая в аналитической механике и аналогичная длине эластичной ленты, называется действием; требование, чтобы она находилась в экстремуме, называется принципом действия[11]. Как оказалось, принцип действия, теория «канонических трансформаций», разработанная Якоби, и величина, связанная с энергией, введенной Гамильтоном (теперь она называется функцией Гамильтона), играют важную роль в формулировке тех научных выкладок, которые должны были заменить механику Ньютона. Это квантовая механика.

Оглядываясь назад, можно сказать, что на заре двадцатого века уже можно было различить предвестников тех переворотов, которые в последующие годы потрясут основы физики. Но в среде физиков преобладало оптимистичное мнение, что прогресс того, что мы сейчас называем классической физикой, будет продолжаться, что новые открытия будут беспрепятственно встраиваться в постоянно расширяющийся, последовательный механизм наблюдений и теории, который был создан таким тяжелым трудом и с такой изобретательностью. Никто не предвидел того, что случилось очень скоро!

ГЛАВА 3

НЕБЕСА НАД НАМИ

О галактиках и звездах

Те из нас, кто живет в городе, лишены возможности созерцать захватывающее дух небо, полное звезд. Чистое ночное небо, не затуманенное выхлопными газами и рассеянным светом наших улиц, представляет собой одно из самых величественных зрелищ природы. На ясном безлунном небе можно различить невооруженным глазом несколько тысяч звезд. Даже бинокль или самый слабый телескоп увеличивают это число во много раз. Млечный путь, который обычному человеку кажется туманной полосой света, пересекающей небо, представляет собой мириады звезд, то есть нашу галактику (цветная иллюстрация 2).Так как земля вращается, создается впечатление, что северная часть небесного свода вращается вокруг Полярной звезды (рис. 3.1), что заставляло древних свято верить в существование небесной сферы.

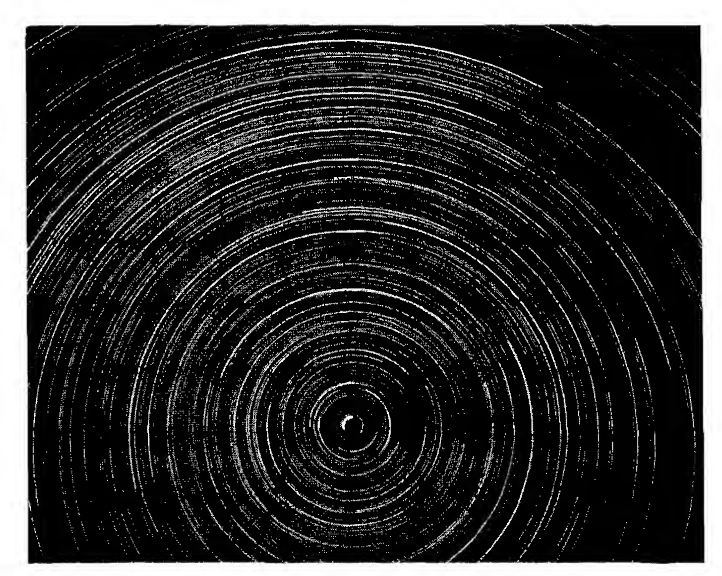


Рис. 3.1. Постоянная панорама ночного неба, показывающая путь звезд по мере их кажущегося вращения вокруг Полярной звезды. (Англо-австралийская обсерватория, фотография Дэвида Мейлина.)

Древние также видели в звездах живописное изображение своих богов и мифических героев. Их имена дали созвездиям названия, которые мы используем до сих пор. В созвездии Андромеды наблюдается туманность, а

само созвездие для невооруженного глаза представляется лишь как неясное световое пятно, а не звезда в виде точки. Это отметил еще тысячу лет назад персидский астроном Азофи Аль-Суфи; спустя тысячелетие это сыграло драматическую роль в изменении нашего восприятия Вселенной. Оказалось, что туманность Андромеды является не просто светящимся газовым облаком, которые мы наблюдаем по всей галактике, но, используя телескоп, в нем можно различить множество отдельных звезд (цветная иллюстрация 3). Понадобился гигантский телескоп и превосходный астроном, чтобы увидеть, что это было не просто скопление звезд, подобно многим уже изученным констелляциям, а нечто такое, как мы увидим позже, что имело гораздо большее значение.

Несмотря на видимое постоянство звезд, небо постоянно меняется. Планеты-«странники», известные с незапамятных времен, меняют свое положение относительно «фиксированных звезд», вращаясь по орбите вокруг Солнца. Также кометы, совершая свой постоянный кругооборот и проходя через солнечную систему, вспыхивают ярким светом при приближении к солнцу, а затем тускнеют по мере удаления к дальним границам солнечной системы. Изменения можно наблюдать даже в отдаленных просторах космического пространства — за пределами Солнечной системы. Время от времени появляется новая звезда — *нова*; на самом деле это *старая* звезда, ранее слишком тусклая, чтобы ее различить, а теперь засветившаяся ярким, хорошо видимым светом благодаря влиянию окружающей среды. Еще реже встречается *сверхнова*, которую в 1987 году наблюдали с Земли в Южном полушарии (цветная иллюстрация 4), — это когда звезда была повреждена взрывом, после чего она стала светиться в сто тысяч миллионов (10^{11}) раз ярче, чем прежде. Есть также звезды, которые становятся более яркими и затем тускнеют, и это повторяется регулярно, подобно небесной сигнальной лампе. Один класс таких звезд называется цефеидами; период регулярных пульсаций цефеид может колебаться от одного дня у одних звезд до пятидесяти дней у других (рис. 3.2).

Примечательно, что период каждой звезды непосредственно связан с ее яркостью, с характерным для нее блеском. Это означает, что можно установить яркость цефеиды, зная ее периодичность, которую легко измерить. Чем дальше от нас звезда, тем бледнее она будет казаться, при этом, согласно хорошо известному закону обратных квадратов, ее видимая яркость уменьшается на коэффициент, пропорциональный квадрату от расстояния до нее. Таким образом, наблюдая видимый блеск цефеиды и установив степень ее яркости по ее периоду, можно определить, на каком расстоянии она находится. Однако чтобы установить соотношение между периодом и яркостью по меньшей мере для некоторых цефеид, необходимо использовать более удобный способ определения расстояния. Некоторые из них, включая «первоначальную» цефеиду, Дельта Цефею, находятся достаточно близко от нас, чтобы наблюдатель мог воспользоваться методом триангуляции, при котором точкой отсчета служит диаметр орбиты Земли вокруг Солнца. Как только установлено соотношение между периодом и яркостью света от этих цефеид, их можно использовать вообще как «стандартные свечи» при определении шкал космических расстояний.

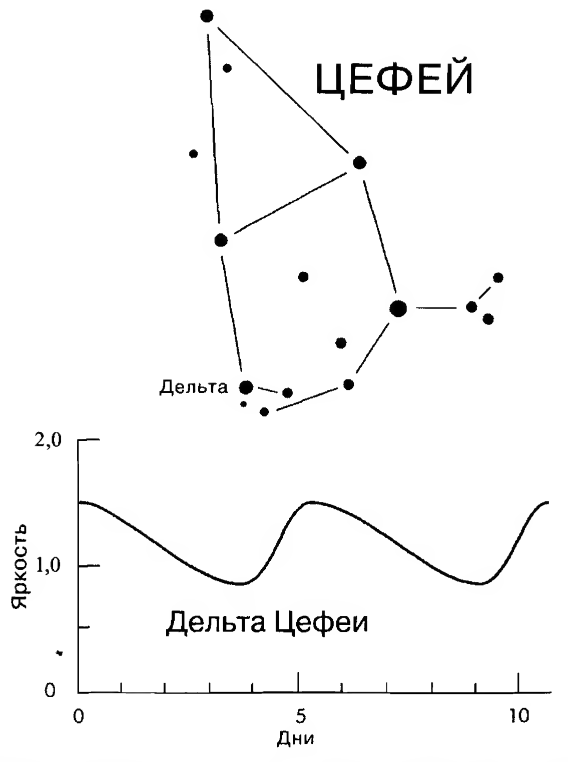


Рис. 3.2. Изменение яркости прототипа переменной звезды цефеиды.

Скорость света равна 3×10^8 метров в секунду (или 186 000 миль/сек). Чтобы солнечный свет достиг Земли, требуется 8 минут, при этом Солнце является самой обычной звездой. Ближайшая к нам звезда, Проксима Кентавра, находится на расстоянии четырех световых лет, а это значит, что свет от этой звезды идет к нам четыре года. Галактика Млечный путь, в которой наше Солнце занимает скромное положение на периферии — около двух третей пути от центра — представляет собой дискообразное скопление звезд, имеющее в поперечнике расстояние в 10^5 световых лет. Она содержит около 10^{11} звезд: это примерно в 50 миллионов раз больше звезд, чем мы можем видеть невооруженным глазом. Сто лет назад считалось, что за пределами галактики нет ничего, кроме пустого пространства. Галактика считалась Вселенной.

В 1923 году самым большим оптическим телескопом в мире был гигантский телескоп на горе Вильсона в Калифорнии с диаметром зеркала 100 дюймов. Его светонакопительная емкость сделала из него мощный инструмент для наблюдения за трудноразличимыми космическими объектами. А в октябре 1923 года Эдвин Хаббл использовал этот телескоп для поиска *новы* в Туманности Андромеды (рис. 3.3).

Туманности, подобные Андромеде, вызывали особый интерес, так как было известно, что они состоят из множества звезд, и такие звездные галактики уже реально рассматривались как возможные «островные Вселенные». Было понятно, что Млечный путь является колоссальным скоплением звезд.

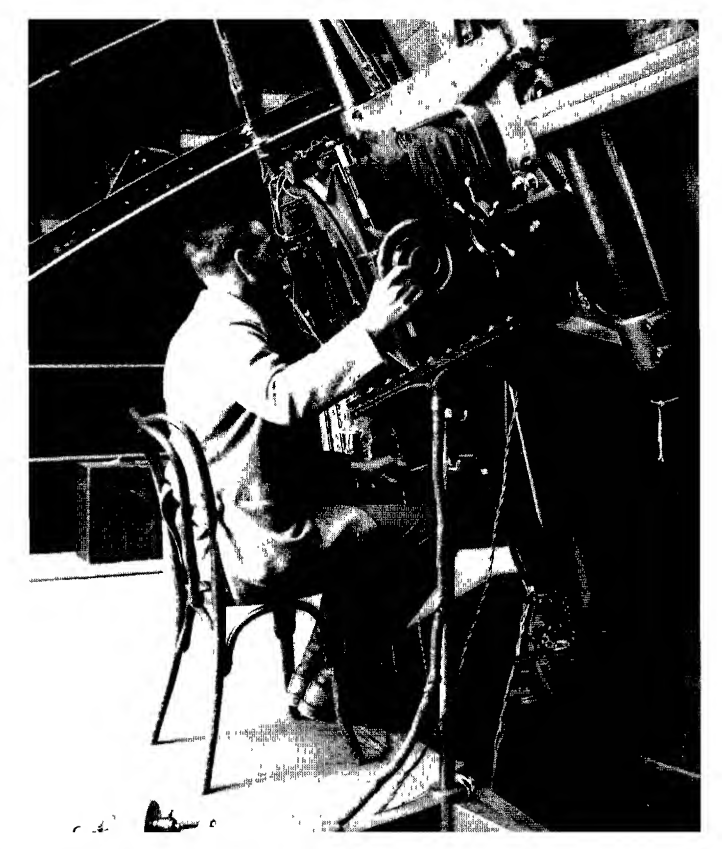


Рис. 3.3. Эдвин Хаббл за 100-дюймовым телескопом Хукер на горе Вильсон. (Обсерватории Института Карнеги в Вашингтоне.)

Но расположена ли Туманность Андромеды внутри его или является лишь его ближайшим соседом?

Регулярно наблюдая туманность, Хаббл смог идентифицировать некоторые звезды, которые изменяли степень своей яркости, как «новы». Но затем он признал, что среди них были звезды с регулярным изменением яркости, характерным для переменных цефеид. Собрав данные об их видимой яркости и периоде их световой пульсации, Хаббл вычислил расстояние до них. Они находились на расстоянии 3 миллионов световых лет. Было ясно, что при такой отдаленности они не могли быть внутри нашей галактики, имеющей, как было уже известно, 10^5 световых лет в диаметре. Он пришел к заключению, что Туманность Андромеды является еще одной галактикой, очень похожей на нашу и расположенной за пределами Млечного пути. Вскоре другие туманности также были идентифицированы как отдаленные галактики. Но величайший вклад Хаббла в астрономию был еще впереди.

Оптические спектры звезд показывают темные линии, линии Фраунгофера, связанные с поглощением света горячими газами на их поверхности. Как мы видели в главе 2, эти линии являются характеристикой элементов, которые обусловливают их появление, а опытному наблюдателю их рисунок

дает сведения о химическом составе газа. Длина световой волны, определяющая цвет света, смещается к голубому концу спектра, если источник движется к наблюдателю, и к красному — если он удаляется. (Такое же смещение в длине волны происходит также у звуковых волн, как было предсказано в 1842 году Кристианом Доплером. Оно отвечает за изменение высоты тона сирены скорой помощи, когда она проезжает мимо.) На основании «доплеровского сдвига» темных линий уже был сделан вывод о том, что Туманность Андромеды мчится к нам со скоростью почти 300 км/сек. Теперь Хаббл обратил свое внимание на другие галактики и снова определил их расстояние способом цефеид-переменной. В течение десяти лет Весто Слайфер собирал данные линейных спектров галактик; он обнаружил, что 36 спектров из 41, изученных им, показывали сдвиг в сторону красного спектра, что означало, что они удаляются. Говард Робертсон заметил связь между измерениями Хаббла и красными сдвигами Слайфера: скорость удаления галактик увеличивалась с увеличением расстояния. Хаббл продолжил этот анализ и сделал вывод, что все галактики, расположенные на большом расстоянии, удаляются от нас. Он обнаружил, что скорость удаления каждой галактики при самом приблизительном подсчете прямо пропорциональна ее расстоянию. Эта линейная зависимость была названа законом Хаббла, который является основным способом определения шкалы расстояний во Вселенной[3].

Таким образом, можно подумать, что такая отдаленность всех дальних галактик от нашей галактики означает, что мы находимся в каком-то привилегированном положении во Вселенной. Но основное предположение современной космологии, восходящее к Николаю Копернику, состоит в том, что подобных привилегированных положений не существует. Существует установка, или, как ее еще называют, ***космологический принцип***, отражающая ту идею, что в сравнительно большом масштабе Вселенная всегда однородна и каждая ее часть во многом такая же, как любая другая. Конечно, поверхность Земли отличается от центра Солнца или от межгалактического пространства. Но в масштабе большем, чем расстояние между скоплениями галактик, эти отличия могут быть усреднены, и тогда Вселенная действительно становится однородной. Если взять за основу то предположение, что в нашем собственном положении во Вселенной нет ничего особенного, разъединение галактик, которое наблюдал Хаббл, подразумевает, что они удаляются не только от нас, но и друг от друга. Лучше всего это можно объяснить, если допустить мысль, что вся Вселенная расширяется с соответствующим увеличением расстояния между *всеми* галактиками. Не то чтобы галактики «разбегались» во все стороны в пространстве: пространство само расширяется, унося с собой галактики. Похожую картину можно наблюдать во время выпечки булочек с изюмом: изюминки в булочке отдаляются все дальше и дальше друг от друга по мере расширения теста между ними.

Кроме этого грандиозного всеобщего расширения существует экспансия меньшего масштаба, вызванная силой притяжения между соседними галактиками. Вот почему галактика Андромеда приближается к нам, а не убегает от нас. Расширение Вселенной является одним из основных факторов в космоло-

гии, и постоянная величина, которая наблюдениях Хаббла связывает скорость удаления с расстоянием, является одним из наиболее решающих параметров в количественном исследовании космологии. Эта константа позволяет нам определить возраст Вселенной и отследить процесс расширения в обратном направлении, до того времени, когда вся Вселенная была ничтожно мала — до большого взрыва, с которого все началось. Несмотря на продолжающееся совершенствование методов Хаббла и большой объем информации, накопленной за многие годы, точная величина постоянной Хаббла до сих пор остается несколько неопределенной, но все согласны с тем, что скорость удаления (в км/сек) приближается к двадцатикратной величине расстояния (в миллионах световых лет)[4]. Предположив, что закон Хаббла, связывающий значительное расширение с расстоянием, является верным, можно определить расстояние до самых отдаленных галактик, доступных для наблюдения. Ученым удалось обнаружить галактики с таким большим расширением, что зафиксированный свет имел длину волны в шесть раз большую своего исходного размера.

Современные телескопы позволяют наблюдать на небе намного менее различимые объекты, заглядывая все дальше в глубины пространства. Поскольку для того, чтобы свет от отдаленных объектов достиг нашей планеты, необходимо время, вести наблюдения на все большие расстояния означает то же самое, что смотреть в прошлое. Свет из галактики на расстоянии в миллиард световых лет шел к нам миллиард лет! Поэтому мы видим эту галактику не такой, какая она сейчас, а такой, какой она была миллиард лет назад. И на самом деле мы видим галактики на этом расстоянии в пространстве и времени — причем миллионы галактик. С помощью космического телескопа НАСА, названного именем Хаббла, фотографы попытались еще дальше, чем когда-либо, заглянуть в глубины космоса, делая снимки инопланетных объектов, которые почти в 4 миллиарда раз менее отчетливые, чем можно увидеть невооруженным глазом (рис. 3.4 и цветная иллюстрация 5).

Хотя это обследование космических глубин охватывает лишь небольшой участок неба, его результаты считаются репрезентативными, и на их основе мы можем сделать заключение, что во всех направлениях от нас на расстоянии до 12 миллиардов световых лет существуют мириады галактик. Во Вселенной столько галактик, сколько звезд в пределах нашего Млечного пути![5]

Еще со времен Хаббла известно, что наша галактика и галактика Андромеды являются лишь двумя представителями группы галактик — местного кластера, который включает также Магеллановы облака, две небольшие соседние галактики, которые видны невооруженным глазом в Южном полушарии. В кластерах часто обнаруживают новые галактики, и многие из них намного более заполнены, чем наш собственный кластер (цветная иллюстрация 6). Наблюдения, проводившиеся в течение двух последних десятилетий, показали, что эти скопления галактик не являются самыми большими во Вселенной, потому что они сами объединены в сверхкластеры, состоящие из десятков, а то и сотен кластеров и растянувшиеся как нити на сотни миллионов световых лет. Между этими растянувшимися сверхкластерами находятся пустоты, огромные пространства, в которых если и есть галактики, то

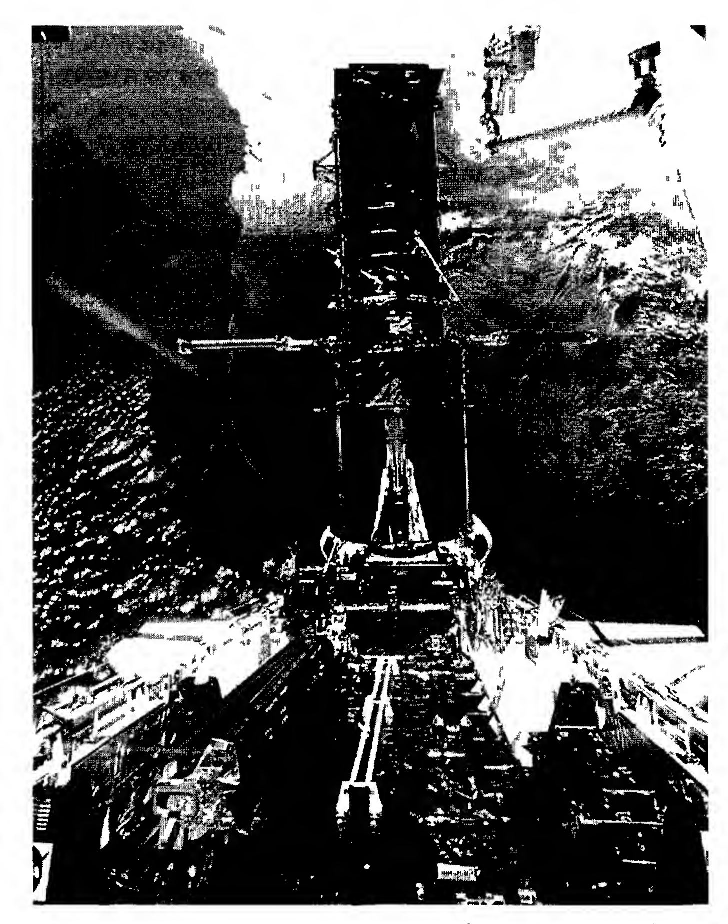


Рис. 3.4. Вид космического телескопа Хаббл и Земли под ним. Фотография была сделана во время космического полета для корректирования оптики телескопа (NASA and NSSDC.)

их очень мало. У нас нет свидетельств существования каких-либо структур за пределами сверхкластеров. Вселенная на уровне более крупных масштабов кажется довольно однообразной и равномерной. Только на этих колоссальных уровнях начинает действовать космологический закон Коперника.

Телескопы, подобные 100- и 200-дюймовым рефлекторам в Калифорнийской комплексной обсерватории на горе Вилсона и Паломар, или космический телескоп Хаббл, с их великолепной светосилой и прецизионной оптикой, являются не только инструментами, с помощью которых современные астрономы могут наблюдать космос[6]. Часть спектра, к которому чувствительны наши глаза, или фотопластины, является лишь малой толикой диапазона длины волны, начиная от длинных радиоволн до очень коротких гамма-лучей, которые излучают все астрономические источники того или иного вида и которые сейчас исследуются с помощью телескопов новых типов.

Изобретения, впервые использованные во время войны, во второй половине XX в. вызвали стремительное развитие радиоастрономии. Одна из спек-

тральных линий, связанная с нейтральными электрическими зарядами в атомах водорода, имеет длину волны 21 см; несмотря на то что эта линия очень слабая, это важно, потому что водород является наиболее распространенным элементом во Вселенной, и астрономы могут использовать его для анализа разреженного газа между звездами. А длина волны 21 см оказалась в пределах диапазона длины волны, который прежде был областью действия военных радаров. Таким образом, радиолокационная технология привела к созданию устройств, которые могут прощупывать небо в поисках источников такого излучения от водорода, и в течение ряда лет эти устройства были усовершенствованы настолько, что могут улавливать из космического пространства радиоволны длиной от нескольких метров до миллиметров. Здесь методы радиоастрономии часто перекликаются с методами, используемыми в инфракрасной астрономии. В диапазоне от инфракрасной до ультрафиолетовой астрономии можно адаптировать методы оптической астрономии. Проблема в том, что атмосфера Земли непроницаема для некоторых длин волн, которые астрономы хотели бы исследовать. Поглощение порций газа в стратосфере и выше, а также полосы непроницаемости обусловливают появление открытых «окон» только там, где видимость возможна, но уже за пределами атмосферы (рис. 3.5).

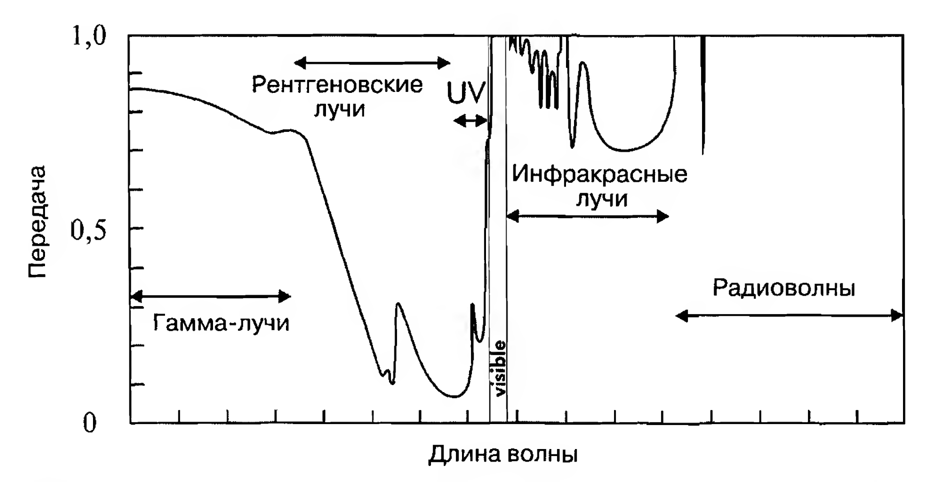


Рис. 3.5. Окна в космосе. Водяной пар и другие газы в атмосфере поглощают излучение от звезд, за исключением нескольких «окон» — длин волн, в которых поглощение намного меньше, что позволяет астрономам «выглядывать» и изучать космическое пространство. Именно окно, выходящее за пределы диапазона длины волн видимого света, позволяет нам видеть звезды

Телескопы на вершинах гор или наблюдения с помощью высотных аэростатов могут «поднять» астронома выше облаков, но ему все равно будет мешать водяной пар или другие надоедливые газы в верхних слоях атмосферы. Чтобы подняться выше, потребовалась помощь искусственных спутников, и именно с детекторов, установленных на них, почти в буквальном смысле стартовали новые направления в астрономии. В настоящее время спутнико-

вая астрономия включает в себя важнейшие программы наблюдения, связанные с дальнейшими исследованиями возможностей радио-, инфракрасного и ультрафиолетового излучения, рентгеновских лучей и гамма-лучей, а также, конечно, с проблемой видимости.

В конце 1960-х, в самый разгар холодной войны, Соединенные Штаты запустили на орбиту серию спутников для отслеживания возможных нарушений договора о запрете ядерных испытаний. Спутники были оборудованы детекторами, которые должны были реагировать на гамма-излучение, характерное для ядерного взрыва в космосе. И они действительно обнаружили вспышки гамма-излучения; однако скоро стало ясно, что оно не имеет никакого отношения к ядерному оружию, а исходит, скорее всего, из космического пространства. В течение нескольких лет существование этих таинственных «выбрасывателей» гамма-лучей замалчивалось военными, но в 1973 году правительство Соединенных Штатов рассекретило информацию о результатах этих наблюдений, а с получением в 1990-х годах дополнительных данных с научно-исследовательского спутника они стали одной из самых горячих тем для обсуждения в астрофизике. Эти вспышки гамма-лучей наблюдаются примерно раз в день, они появляются по всему небу и длятся от доли секунды до нескольких минут. Поскольку гамма-лучи распределены по небу очень равномерно, стало ясно, что их источник находится вне галактики, хотя считалось вполне возможным, что они могут возникать в галактическом «ореоле» (гало) — рассеянном сферическом облаке звезд, протянувшемся на миллион световых лет за пределы основного дискообразного скопления звезд, образующих Млечный путь. Эти звезды удивительно яркие, так что если они возникли вне нашей галактики, они должны быть *чрезвычайно* мощными источниками излучения. В первые 10 секунд излучатель выбрасывает больше энергии, чем Солнце за 10 миллиардов лет своего существования! Их природа и местонахождение вызывали споры вплоть до 1998 года.

Спутник, названный BeppoSAX, оборудованный детекторами как гамма-, так и рентгеновских лучей, определил, что после затухания всплеска гамма-лучей при воздействии излучателя остается свечение рентгеновских лучей, которое может продолжаться несколько дней. Два таких наблюдения в 1997 году дали впечатляющие результаты. 28 февраля детекторы спутника зафиксировали всплеск гамма-излучения; в течение нескольких часов проектная группа нацеливала рентгеновский телескоп на этот всплеск и обнаружила быстро затухающий источник рентгеновских лучей. Это также было отмечено спутником «Улисс», основной задачей которого было исследование солнца. Затем астрономы, используя британо-датский телескоп в Ла Пальма, смогли записать оптическое изображение места всплеска в течение неполного дня после его первого обнаружения. Еще одно изображение того же участка неба, полученное восемь дней спустя, показало, что источник света, видимый в первом оптическом изображении, постепенно угас к тому времени, когда было получено второе изображение — эта затухающая звезда была, вероятно, видимым светом, исходящим от излучателя. Затем космический телескоп Хаббл обнаружил с трудом просматриваемую галактику в той же части неба (цветная

иллюстрация 7); возможно, источник гамма-излучения находился в этой галактике. Десять недель спустя таким же способом был обнаружен еще один излучатель, но на этот раз оптические наблюдения можно было производить с помощью 10-метрового телескопа Кек II на Гавайях, и наконец оптический спектр был получен. Теперь, чтобы определить расстояние до источника всплесков излучения, можно было использовать принцип доплеровских сдвигов в спектральных линиях. Он удален приблизительно на 7 миллиардов световых лет — это один из самых дальних изучаемых объектов. Это также означает, что он должен быть невероятно мощным источником излучаемой энергии, чтобы казаться таким ярким на таком огромном расстоянии. В настоящее время принято считать, что всплески гамма-лучей приходят от удаленных на громадное расстояние галактик и что их необычайно мощные выплески энергии могут происходить из-за столкновения между двойными нейтронными звездами.

Астрономия прошедшего полстолетия раскрыла многие удивительные тайны. Среди них — *квазары* (квази-звездные радиоисточники), необычайно мощные радиоисточники, излучающие огромные порции энергии из сфер, намного меньших, чем галактика. Сейчас принято считать, что каждый квазар связан с гигантской черной дырой в центре галактики; выдвигаются даже предположения, что в центре каждой галактики, включая нашу, расположена черная дыра, хотя не все они находятся в «активной» фазе, во время которой выплескивается огромное количество энергии, когда в них падают звезды[7]. Большинство квазаров удалены на миллиарды световых лет, а это означает, что они очень старые. Квазары нельзя отнести к раннему периоду существования Вселенной — было сделано предположение, что существует квазар, погруженный в очень яркий радиоисточник Сигнус А, который расположен относительно рядом, «всего лишь» на расстоянии 600 миллионов световых лет. Некоторые квазары излучают также гамма-лучи, а один из них вспыхнул в июне 1991 года и стал одним из ярчайших объектов гамма-излучения большой энергии в космосе, что особенно удивительно, принимая во внимание его огромную удаленность на 4 миллиарда световых лет. Это пример активных галактик нового класса, известных под названием гамма-блазаров. Блазары – это вид квазаров, которые демонстрируют очень быструю изменчивость в отношении интенсивности излучения, возникающую, как принято считать, благодаря эмиссии при скорости, близкой к скорости света, и направленным в нашу сторону потокам материи, генерируемой сверхмассивной черной дырой. Для обеспечения непрерывного мониторинга на небе этих интенсивных, но кратковременных вспышек и затуханий была организована сеть тесно взаимодействующих наблюдателей — Whole Earth Blazar (WEB) Telescope (Блазарный телескоп всей земли).

Черные дыры — более массивные, чем миллион звезд, — можно найти в центре большинства галактик. Но в космосе можно найти не только такие сверхмассивные черные дыры. Вполне обычные звезды также могут стать черной дырой. Мы довольно много знаем о том, как рождаются звезды и как они умирают; знание жизненного цикла звезд является одним из главных до-

стижений астрофизики двадцатого века. Звезды рождаются, когда рассеянные облака из водорода и остатков других материалов конденсируются под действием их собственной гравитационной силы притяжения, становясь при этом все горячее (как воздух в велосипедном насосе). В конечном итоге, если сжимающееся облако становится достаточно горячим и плотным, запускаются термоядерные реакции, которые посредством сложного цикла изменений превращают водород в гелий и затем в более тяжелые элементы (иллюстрация 8). Процесс сжатия газа таких концентраций достаточно хорошо изучен, чтобы объяснить, как могут формироваться звезды, имеющие массу, начиная от 8% и больше от массы Солнца (при меньшей массе газ никогда не разогреется так, что может возникнуть ядерная реакция). Что происходит потом, опять-таки сложно объяснить, но к настоящему времени уже есть определенные версии. То, каким образом заканчивается существование звезды, зависит от ее массы.

Хотя сэр Артур Эддингтон размышлял над возможностью превращения звезды в черную дыру в результате коллапса, он отверг эту идею как слишком уж ужасную и неправдоподобную. В 1931 году Дж. Роберт Оппенгеймер и Хартланд Снайдер серьезно увлеклись этой идеей и пришли к заключению, что достаточно массивная звезда, скорее всего, превратится в черную дыру. А в настоящее время имеются многочисленные доказательства того, что некоторые из обнаруженных объектов, особенно из числа источников рентгеновского излучения, взаимодействуют с материей, попадающей в такие черные дыры.

Более распространенным результатом звездной эволюции является превращение звезды в *«белого карлика»*. Астрономии известны многие белые карлики. Это звезды, которые обрушились под тяжестью своего собственного веса и уменьшились до размера нашей Земли; вся их энергия исчезла, но они все еще продолжают ярко сиять — из-за остывающего жара термоядерного пламени, который был причиной яркого блеска на ранней стадии их эволюции.

Еще одним следствием коллапса может быть звезда, имеющая всего несколько километров в поперечнике и сжатая до плотности атомного ядра. Такие звезды называются нейтронными, некоторые из них имеют очевидные признаки пульсаров, вспыхивающих, как небесные маяки, при стремительном вращении и регулярно посылающих в нашу сторону радиационные лучи. Первый пульсар открыла Джослин Белл, которая в ту пору была аспиранткой в Кембриджском университете и работала с радиоастрономом Энтони Хьюишем. Она занималась поиском мерцаний в радиосигналах звезд, аналогичных известному «оптическому миганию». При использовании построенного Хьюишем радиотелескопа с высокой разрешающей способностью, обеспечиваемой антенной решеткой из 2048 антенн, занимающих площадь 18 000 кв. м, она заметила, что один из наблюдаемых ею источников не просто мерцал (мигал, как звезды, которые мы видим невооруженным глазом), а подавал необычайно ритмичные импульсы. Сначала казалось невероятным, что эта регулярность могла возникать без вмешательства разумных существ[8];

но к тому времени уже был составлен теоретический прогноз, который мог объяснить этот феномен, и после того как были отброшены неправдоподобные версии объяснения, астрономы пришли к выводу, что на самом деле пульсар Белл является быстро вращающейся нейтронной звездой. В 1974 году Хьюиш стал одним из лауреатов Нобелевской премии благодаря открытию Джослин Делл — впервые эта премия была присуждена в области астрономии. Джослин Белл не была включена в группу лауреатов; но многие физики считают, что она заслуживала этой премии[9].

В 1054 году в созвездии Тельца китайские астрономы наблюдали «звезду-гостью», которая была, как мы теперь знаем, сверхновой; она выбросила облако газа, которое еще можно видеть, хотя свечение уже уменьшилось. Это облако называется Туманностью Рака; в ее центре остается тусклая звезда, которая к тому же является пульсаром (цветная иллюстрация 9). Есть много других расширяющихся облаков газа, окружающих следы взрывов сверхновы. Взрыв сверхновы, зафиксированный в 1987 году у нашего галактического соседа, Большого Магелланова Облака, продолжает быть объектом пристального наблюдения. Ожидается, что его осколок станет пульсаром, но пока неясно, будут ли получены подтверждения этой версии[10].

У звезд часто бывают «компаньоны»: две звезды могут быть связаны друг с другом силой взаимного тяготения и вращаться вокруг своего общего центра тяжести. Например, Сириус, самая яркая звезда в северной части неба, имеет слабо светящегося «партнера», который, по сути, является белым карликом. Еще одна постоянно наблюдаемая звезда-пульсар, также представитель двойной системы, стала источником информации для составления прогнозов общей теории относительности. У нас будет возможность поговорить об этом двойном пульсаре более подробно в главе 9.

На пути к гибели, как и «белые карлики», нейтронные звезды, или черные дыры, переживают краткий период, во время которого их закат сопровождается внезапным взрывом. Это взрыв сверхновы, финальный всплеск термоядерных реакций, вызванных резким подъемом температуры во время обрушения звезды под тяжестью своего собственного веса. Когда это происходит, звезда может выбросить большую часть своего содержимого — пепел, оставшийся от более ранних реакций. Он будет включать много элементов, более массивных, чем водород, из которого звезда была образована, а в условиях интенсивного радиоактивного излучения происходят разнообразные ядерные превращения. Сформированное таким способом газовое облако — это то, что мы видим в окружении сверхновы, подобно Туманности Рака. Материя на первых стадиях существования Вселенной почти целиком состояла из водорода и гелия с крошечными частичками некоторых легких элементов, таких как литий. *Все* более тяжелые элементы Вселенной были образованы на поверхности звезд и рассеяны в пространстве во время взрывов сверхнов, включая углерод, кислород и азот, из которых состоят наши белки. Мы сделаны из звездной пыли.

Существует несколько различных видов сверхновы, возникающих по-разному. Для одного вида механизм запуска аналогичен тому, который приводит

к вспышке новой звезды: сила тяжести забирает материал у звезды-партнера. В этом случае вспышка сверхновы происходит в тот момент, когда накопленная масса притягивает звезду, бывшую ранее белым карликом, вместе с массой, превышающей так называемый предел Чандрасекхара. Астроном-теоретик, индус по происхождению, Субраманьян Чандрасекхар доказал, что, если масса белого карлика превышает критический уровень (примерно в 1,4 раза от массы Солнца), ее ожидает неминуемая катастрофа. Когда это случается, высвобождается огромное количество энергии, и именно она служит силовым двигателем взрыва, во время которого сверхнова может затмить своим блеском все остальные звезды своей галактики. Позже от обрушившейся звезды остается черная дыра. Этот процесс, хотя он и сложный, представляется достаточно последовательным, чтобы подтвердить то, что явно следует из наблюдений, а именно: все эти сверхновы обладают свойственной им яркостью, и эта яркость соотносится с закономерностью изменения яркости во времени при прямом наблюдении в течение тех немногих дней, когда они так ярко светятся. Следовательно, если можно измерить режим изменения яркости такой сверхновы во времени, можно определить присущую ей степень свечения, т.е. то, насколько сильным источником радиации она является. И затем, исходя из ее видимой яркости, можно вычислить расстояние до нее: ее видимая яркость уменьшается на квадрат относительно расстояния до нее. Итак, этот класс сверхнов обеспечивает идеальных «кандидатов» в «стандартные свечи» для отдаленных галактик, в которых они могут оказаться. Важнейшее значение этих звезд состоит в том, что переменные звезды-цефеиды можно использовать для определения расстояния, при условии, что их можно выделить как отдельные звезды в галактике — а это невозможно, когда речь идет об очень далеких галактиках. Такой новый, *прямой* способ определения расстояния можно сравнить с методом, основанным на изучении сдвигов таких галактик к красному спектру . Когда этот метод получил распространение, оказалось, что результаты, полученные благодаря наблюдениям за отдаленными галактиками и опубликованные в 1998 году, свидетельствуют о том, что расширение Вселенной Хаббла *ускоряется.*

Это предположение вызывает удивление, так как, согласно ожиданиям, сила притяжения между галактиками должна была бы замедлять расширение, инициированное большим взрывом. Если же оно действительно ускоряется, значит, должен существовать какой-то источник отрицательного давления, который отталкивает галактики друг от друга, в противовес силе тяжести, которая притягивает их друг к другу. О существовании такой силы уже давно догадывался Эйнштейн. Вскоре после того, как он в 1915 году впервые сформулировал общую теорию относительности, Эйнштейн обратил внимание на космологию. Он искал решения для своих уравнений, которые позволили бы получить космологическую модель, совместимую с космологическим законом Коперника — в его модели Вселенной не должно было быть «особых мест». Он также хотел, чтобы его модель Вселенной была *статичной* (т.е. в ней тоже не должно было быть «особого времени»). Не было оснований для того предположения, что на космологическом уровне Вселенная не является ста-

тичной: Хаббл еще не появился! Эйнштейн считал, что его уравнения общей теории относительности не позволяют выполнить оба эти условия, и поэтому модифицировал эти уравнения, введя дополнительный термин — так называемый космологический элемент, или «ламбду». Но к 1931 году он пришел к заключению, что в таком термине нет необходимости, и в более поздние издания книги «Значение понятия относительности» («The meaning of Relativity», Princeton, N.J.: Princeton University Press, 1950), написанной на основе лекций, прочитанных им в Принстоне в 1921 году, он включил следующую сноску:

Если бы расширение Хаббла было открыто в период создания общей теории относительности, космологический элемент никогда бы не был введен. Сейчас представляется намного менее оправданным введение такого термина в уравнения поля, так как при этом он лишается своего единственного оправдания — возможности способствовать естественному решению космологической проблемы.

Но в настоящее время существует новое оправдание, или по меньшей мере мотивация, принять во внимание такой термин. Причиной этого служит небольшая, но не нулевая космологическая константа (в вышеприведенной цитате Эйнштейн называет ее «космологическим элементом»), которая может объяснить ускорение расширения Хаббла, предполагаемое по результатам наблюдений за далекими галактиками. Данные о сверхновах, которые, по-видимому, нуждаются в подобных исследованиях, будут обязательно расширены в начале нового века, и их уже с нетерпением ждут. Однако сверхновы в далеких галактиках могут отличаться от более близких сверхнов. Если у них нет такой же выраженной яркости и, следовательно, их нельзя принимать за стандартные свечи, вся цепочка логических рассуждений, ведущая к выводу об ускорении расширения Хаббла, разорвется, и космологический элемент в конце концов может и не понадобиться.

У нас также есть все основания верить, что кроме материи, которую мы можем видеть, — звезды и облака газа, мешающие их созерцать, — есть что-то невидимое, чье присутствие проявляется только через его гравитационное воздействие. Эта *темная материя* не может быть «обычной материей» — например, мертвыми звездами, которые больше не светят, — потому что это имело бы другие, хотя и косвенные, последствия, кроме тех, которые возникают из-за силы тяжести. Так что же это такое — эта загадочная темная материя? Одним из возможных ответов может быть существование некой элементарной частицы, которая взаимодействует с обычной материей, но так слабо, что ее еще никто не обнаружил. В настоящее время проводятся опыты по поиску таких WIMPs (слабо взаимодействующих тяжелых частиц), как их теперь называют. Теоретики выдвинули свои альтернативные варианты, но пока не будет получено более прямых доказательств, поиск темной материи останется одной из самых волнующих тем для научных исследований в астрономии.

Есть одно небольшое, но очень важное исключение из космологического закона Коперника о всеобщей однородности — одно небольшое свойство Вселенной, которое почти, но не совсем, является равномерным и однородным. Это знаменитое космическое микроволновое фоновое излучение. Оно

было открыто в 1964 году Арно Пензиасом и Робертом Вильсоном, которые работали в лаборатории Bell Telephone Laboratories, исследуя источник радиопомех, который мог бы помешать работе разрабатываемой в то время системы спутниковой связи. Они обнаружили, что, куда бы они ни направляли свою 20-футовую антенну, помехи не исчезали, и после использования всех доступных средств пришли к заключению, что их источник находится вне нашей галактики. То, что они открыли, представляет собой радиацию черного тела, которая пронизывает Вселенную, — послесвечение большого взрыва, в горниле которого она и появилась. По мере своего расширения Вселенная остывает. Когда Вселенной было около 300 000 лет, ее температура упала до уровня 3000 К. Впервые стало возможным появление нейтрально заряженных атомов, и затем Вселенная стала беззащитной перед радиацией. Эта радиация, заполнившая Вселенную, и стала открытием Пензиаса и Вильсона. Это то, что мы сейчас наблюдаем как микроволновую, фоновую радиацию. Это была радиация черного тела, когда Вселенной было 300 000 лет, соответствующей тогдашней температуре 3000 К. Но теперь Вселенная стала в 1000 раз больше, поэтому она остыла. Длина волны радиации вытянулась на тот же коэффициент — 1000, а в результате осталась все та же радиация, но теперь при температуре всего 2,728 К (рис. 3.6). Прошу обратить внимание на точность, с которой она была измерена, — почти в 10 раз точнее, чем можно было бы получить при использовании обычного ртутного термометра!



Рис. 3.6. Спектр космического микроволнового фона, измеренного с помощью спутника COBE. Данные отличаются от кривой Планка, представляющей собой прогноз уровня радиации черного тела, менее чем на толщину линии на графике. Примечательно, что космический микроволновой спектр является самым точным из когда-либо наблюдаемого спектра черного тела. (Данные COBE, полученные ЦУПом Годдара НАСА под руководством научной рабочей группы COBE и предоставленные NSSDC.)

Спутники подняли чувствительные детекторы выше уровня мутных атмосферных газов, чтобы произвести максимально детальные измерения этой радиации. Полученный результат удивительно соответствует точной форме

кривой, предсказанной в законе Планка; фактически получен самый достоверный из когда-либо наблюдаемых спектров черного тела. Причем он является в высшей степени равномерным по всем направлениям. Но не полностью. Единственным исключением в этой равномерности — небольшим, но ожидаемым — стал доплеровский сдвиг, производимый комбинацией движения Земли вокруг Солнца, Солнца в галактике, галактики внутри ее местного кластера и даже местного кластера внутри его сверхкластера, который добавляет почти 600 км/сек! Но кроме этого существуют небольшие отклонения от равномерности на уровне одной стотысячной доли (цветная иллюстрация 10). И это вместе с существованием сверхкластеров и их размерами служит важным ключом к разгадке того, как все эти структуры, заполняющие небо, от сверхкластеров до звездных галактик и планет внутри их, развивались после большого взрыва.

Первые десятилетия третьего тысячелетия обещают быть богатыми на новые открытия в результате наблюдений. Например, МАР НАСА (микроволновый анизотропный зонд) и экспедиция, организуемая Европейским космическим агентством и названная в честь Планка, еще больше обогатят нас знаниями о флуктуациях в плотных слоях атмосферы на самых ранних стадиях существования Вселенной, из которых, в свою очередь, мы многое узнаем о том, как формировались галактики и звезды. Появились ли сначала звезды, чтобы потом объединиться в галактики, или это было по-другому — когда материя концентрировалась в виде больших галактических облаков, внутри которых затем в результате уплотнения возникали звезды? Этого мы не знаем, но мы будем искать ответ!

Международные организации запускают спутники нового поколения для исследования источников рентгеновского излучения (как, например, Рентгеновская обсерватория Чандра, проект НАСА[14]), которые оборудованы намного более совершенной техникой для получения более четких снимков, чем когда-либо прежде. Они расскажут нам о выбрасывании потоков материи из центральных — более плотных областей галактик, прилегающих к супермассивным черным дырам, и о других высокоэнергетичных участках Вселенной, таких как места, содержащие остатки горячего газа от взорвавшихся звезд. Международная гамма-астрофизическая лаборатория ИНТЕГРАЛ Европейского космического агентства вскоре сможет получать четкие снимки источников гамма-лучей и с высокой точностью измерять их интенсивность. Ее запуск намечен на октябрь 2002 года на базе русского носителя Протон. Это и другие мероприятия позволят нам решить некоторые спорные вопросы, которые астрофизика и космология двадцатого века передали будущему поколению.

ГЛАВА 4

СЛУЧАЙНОСТЬ И ДОСТОВЕРНЫЙ ФАКТ

Странный мир квантовой механики

В детерминистском, классическом мире физики Ньютона для случайности остается мало места; любая неопределенность будет казаться ограничивающей нас неточностью наших несовершенных измерений. Хотя комплексные системы анализировать невероятно трудно, мы можем попытаться справиться с этим, для начала изучив свойства составляющих их частей, следуя редукционистской стратегии. Триумф классической физики базируется именно на этом подходе. Что может быть проще системы, содержащей одну-единственную частицу, движущуюся под воздействием известной силы? Но даже для такой простой системы потребовалась большая интуиция и проницательность, прежде чем был сформулирован общий закон. Нужно было дальше развить понятие *частицы,* как это произошло с понятием *силы.* И даже описание понятия движения, *кинематики* необходимо было тщательно продумать, прежде чем приступить к серьезным научным исследованиям. Исаак Ньютон подходил к этому вопросу сознательно и серьезно, и этот ритуал был обязательным в классической физике на протяжении двух последующих веков и даже больше.

Казалось естественным перейти от исследования одной частицы к изучению двух, затем нескольких и так далее. Более трудным был переход от частиц к крупным объектам, и к этому приступил сам Ньютон. Что сказать о силах, которые создают ускорение, заставляющее частицы отклоняться от движения по прямой с постоянной скоростью (признанное уже Галилео Галилеем как «естественное» движение тела, свободное от приложенной силы)? Например, гравитация: сила, действующая в пустом пространстве (какие загадки скрывались здесь!), в соответствии с законами, такими простыми и устойчивыми, что 24-летний Исаак Ньютон смог увидеть, что одни и те же законы объясняют падение яблока с дерева, ежемесячный кругооборот Луны вокруг Земли, приливы и отливы, движение планет вокруг Солнца. Эти же простые законы динамики Ньютона и универсальная сила тяготения — это все, что необходимо для точного расчета траектории космических аппаратов и искусственных спутников с целью договориться о встрече в космическом пространстве или послать исследователей к границе Солнечной системы и за ее пределы.

Конечно, кроме силы тяготения существуют и другие силы. Еще одним столпом, на который опирается классическая физика, является электродинамика, которую лучше всего представляют уравнения Максвелла. Электрические и магнитные силы, как и гравитация, действуют между частицами, разделенными пространством. По теории Максвелла, силы перено-

сятся через пространство между частицами с помощью *полей* — физических величин, занимающих пространство. В электродинамике Максвелла они не только являются силовыми полями (что уже подразумевается в теории гравитации Ньютона), но также имеют свои собственные характеристики. Электромагнитные поля, так же, как и частицы, с которыми они взаимодействуют, несут в себе энергию и некоторое количество кинетической энергии. Их поведение согласуется с теми же основными динамическими законами механики Ньютона, если принять тот факт, что поля имеют протяженность в пространстве, в противоположность дискретным, точечным частицам. Эти динамические законы можно выразить в уравнениях движения. Как механика Ньютона, так и электродинамика Максвелла описывают системы, которые развиваются во времени в соответствии с простым уравнением. Это значит, что, если иметь достаточно знаний о системе в какой-то момент времени, (начальные условия), можно дать точное и недвусмысленное определение ее поведения в будущем. Динамика (для систем, свободных от внешних помех) является полностью *детерминистической* наукой.

Пьер-Симон Лаплас сделал предположение[1], что, в *принципе* можно предсказать будущее, основываясь на точном знании о настоящем. На практике даже в классической физике это было в лучшем случае несбыточной мечтой. Отслеживать движение 1024 молекул воздуха в велосипедном насосе в любом случае является неразумным способом для объяснения факта нагревания воздуха в надутой шине. Усредненный и наиболее правдоподобный механизм действия макроскопической системы, составленной из большого числа частиц, можно изучить без подробного описания свойств каждого из ее микроскопических или атомных компонентов. Можно описать свойства воздуха в шине, зная его давление, температуру и объем. Подобный метод заимствован из термодинамики — очень практичной науки, созданной Сади Карно и другими учеными, заинтересованными в разработке более совершенного парового двигателя. Но эти же законы термодинамики можно получить, применив принципы механики Ньютона, например, к молекулам воздуха, заполняющего шину, в статистической форме; при этом возникают характеристики, подобные температуре энтропии, которые приобретают значение только тогда, когда число частиц в системе является очень большим. Можно сказать, что термодинамика, статистическая механика и динамика Ньютона служат примером редукционистской иерархии в рамках физики. Вполне вероятно, что, исходя из этих основных законов, можно вычислить температуру, при которой кипит вода, используя только физику и химию молекул воды, но действовать именно так было бы неразумно, поскольку это ничего не добавило бы к нашему пониманию фазовых переходов (таких, как переход между жидкостью и паром) и еще меньше — к фундаментальным законам, определяющим силы взаимодействия между атомами.

Статистическая механика и термодинамика сами по себе являются важными отраслями физики; они также играют важную роль в научных революциях, которые изменили детерминистические понятия старой, классической парадигмы и стали причиной более гибкого, но менее устойчивого

представления о Вселенной. Одной из побед статистической физики была демонстрация того, каким образом появляются точные законы термодинамики макроскопических систем, если известны параметры усредненного и наиболее вероятного движения их микроскопических компонентов. Не было необходимости вводить законы термодинамики как законы, независимые от природы; их можно было вывести из законов механики. Но статистическая механика, при использовании ее принципов в исследованиях радиации, также раскрыла глубокую — по сути, фундаментальную — проблему.

Представьте литейный цех. Железо, нагреваемое в печи, выделяет излучение; и чем выше температура, тем сильнее становится излучение. По мере нагревания спектр излучения (т.е. распределение интенсивности по частоте, относительная интенсивность, скажем, инфракрасного света к видимому свету и т. д.) также меняется. Частота, при которой возникает максимальная интенсивность, увеличивается так, что, например, при 600 °С излучение будет самым сильным на инфракрасном участке спектра — вы можете чувствовать жар — но он еще не раскален докрасна, в то время как при температуре 6000 °С данную температуру поверхности Солнца, максимальную в спектре излучения, можно будет определить по зелено-голубому диапазону видимого света, и по всему диапазону цветов радуги, от красного до фиолетового, будет наблюдаться сильное излучение. Одна из главных проблем, стоявших перед физиками в конце девятнадцатого века, заключалась в том, чтобы объяснить то, что кроется за известным явлением, — максимальным сдвигом в спектре, который заставляет железо светиться сначала тускло-красным, затем более ярким оранжевым и, когда оно нагревается, желтым светом.

Было уже известно из законов термодинамики, что чем лучше тело поглощает излучение, тем лучше оно его выделяет; следовательно, идеальный излучатель должен быть идеальным поглотителем излучения, и по этой причине его назвали *черным телом.* Как было уже сказано в главе 2, для черного тела спектр излучаемого света зависит только от температуры и больше ни от каких других свойств тела. Это предопределило возникновение гениальной догадки Лармора: считать спектр черного тела функцией температуры.

За последнюю четверть девятнадцатого века были достигнуты огромные успехи как в теории излучения черных тел, так и (что не менее важно) в точности, что позволило новой экспериментальной технике производить измерения спектра, особенно в инфракрасном диапазоне. Стало ясно, что термодинамика не может сама по себе принять этот вызов, но более совершенный уровень теории, предложенной статистической механикой, позволил внести в нее дополнительные сведения. Выведенная таким образом спектральная формула черного тела довольно хорошо согласовывалась с последними экспериментами в области инфракрасного излучения. Но эта формула имела шокирующее и неприятное последствие: в ней утверждалось, что при любой температуре *общая* скорость, с которой будет происходить излучение энергии, является *бесконечной.* Эта «ультрафиолетовая катастрофа», как ее теперь называют, должна была подорвать все здание

классической физики. Она уничтожала детерминистические законы механики Ньютона и разрушала представление о Вселенной как о часовом механизме, который с того момента, как он был запущен, шел по предсказуемому пути, следуя жестким и непреложным правилам.

От Ньютона и далее классическая механика развивалась уже с большей интенсивностью, а ее формулировка расширялась с бóльшей элегантностью и математическим совершенством. Одна из величин, введенных в науку в этот плодотворный период, была названа *действиéм* — термин, впервые использованный Пьером Мопертюи в XVIII веке в его исследованиях механики. Действие — это математическое выражение, характеризующее динамический процесс; оно состоит из энергетического продукта системы и длительности процесса. Понятие действия является частью разработки аналитической механики — окончательной редакции механики Ньютона, связанной с именами Джозефа-Луи Лагранжа, Карла Якоби и Уильяма Роувана Гамильтона. В начале XX века проблема ответа на вопрос о черном теле состояла в том, чтобы придать новый глубокий смысл понятию действия путем ввода в физику совершенно новой фундаментальной константы — кванта-действия, постоянной Планка.

Макс Планк сделал несколько попыток, прежде чем наткнулся на то, что оказалось правильным подходом к радиации черного тела. В математике часто бывает более удобным приблизиться к константе через последовательность дискретных шагов[3]. (Метод исчисления эквивалентен осуществлению такого приближения и получению точного результата благодаря последующим дискретным шагам, стремящимся к нулевой величине.) В действительности Планк на этом остановился, когда величины, хотя и маленькие, были еще конечными. Он использовал методы, считавшиеся в то время стандартными и основанные на статистической механике, но предположил, что черное тело может излучать или поглощать радиацию только в дискретных количествах, или *квантах,* каждый из которых имеет энергию, пропорциональную частоте радиации. Коэффициент пропорциональности между энергией и частотой является новой фундаментальной постоянной, обозначенной Планком как h (и с тех пор ее так же обозначают все физики). Эта единица действия устанавливает масштаб явлений, в котором классическая механика Ньютона больше не работает.

Если бы это был просто математический способ, предварительная дискретизация, за которой следует переход к ограничению, в котором h становится сверхмалой величиной, «ультрафиолетовая катастрофа» возникла бы еще раз. Классическая физика, физика континуума, вновь возродилась бы, со всеми своими успехами и катастрофическими провалами. Но квантовая физика, предложенная Планком в 1900 году, не позволяет h стремиться к нулю. Постоянная Планка h-действия имеет величину, на самом деле очень маленькую, если она выражена в обычных макроскопических технических единицах[4]. Но, как мы увидим далее, для микромира атомной и субатомной физики это значение не является ничтожным. То, что оно конечно, хотя и незначительно, предотвращает катастрофу раскаленных тел,

излучающих энергию невероятно быстро. И благодаря этой конечности, хотя и ничтожно малой, физике свойственна характерная неоднородность; сглаженная однородность классического мира уступила дорогу произвольному, но статистически предсказуемому квантовому скачку. Кванты можно сосчитать — по одному за раз; подобно частицам, их можно подвергать излучению или поглощению.

И здесь опять возникает дилемма. Ньютон в своей «Оптике» отнесся благосклонно к возможностям корпускулярной природы света, то есть к тому, что свет имеет свойства частиц. Но с наступлением девятнадцатого века и начатых Томасом Янгом исследований преломляемости света и других проявлений волнообразного движения, вызванного явлениями интерференции, корпускулярная теория была забыта. Наиболее вероятно, что свет действительно имеет волновой характер, с резкими отклонениями в амплитуде, усиливающими максимумы, и резкими отклонениями, перекрывающими впадины, подобно расходящейся волновой ряби на водной поверхности водоема (рис. 2.2). В электродинамике Максвелла дается великолепное описание света как комплекса электрических и магнитных полей, колеблющихся в пространстве и времени, — по сути, как волн, распространяющихся в разреженном пространстве с ограниченной и неизменно постоянной скоростью. Скорость света в вакууме, обычно обозначаемой как c, является еще одной фундаментальной константой природы. Историк Эрик Хобсбаум позволил себе «отложить» начало двадцатого века на 1914 год[5], и если бы мне была дана такая же свобода выражения, я бы сказал, что в физике двадцатого века господствовал квант (h), считающийся крошечным и ограниченным своими размерами, в то время как в девятнадцатом веке господствовало понятие скорости света (c), которая была признана большой величиной, но тоже ограниченной. Со времени Максвелла и экспериментов Янга и Августина Френеля, Фраунгофера и Майклсона никто не сомневался, что свет (на самом деле все электромагнитное излучение) имеет волновую природу. Конечно, наряду с такими волнообразными величинами, как частота и длина волны, можно было бы признать и объяснить такие механические свойства, как энергия и импульс. Но в этой схеме не было места для света в виде частиц, квантов, фотонов, каждый их которых содержит дискретное количество энергии и импульс.

Признание фотонов в качестве реальных физических объектов, а не просто неких математических элементов, введенных для того, чтобы избежать теоретической проблемы, получено благодаря работам Эйнштейна. В одной из четырех больших работ, опубликованной в 1905 году, он дал объяснение *фотоэлектронной эмиссии.* (Когда свет падает на металл, может произойти выброс электронов, что приводит к подаче порции электричества. Именно за эту работу, а не за теорию относительности, Эйнштейн в 1921 году получил Нобелевскую премию по физике.) Эта эмиссия была открыта Генрихом Герцем и всесторонне изучена экспериментатором Филиппом Ленардом. Ленард был ведущим представителем школы германских экспериментаторов, которых резко критиковали то, что они вос-

принимали как порочное господство математической теории в сравнении с экспериментом и феноменологией. Это было особенно характерно для английской физической школы, а Ленард был откровенным англофобом[6].

Существовали напряженные отношения между физиками-экспериментаторами, которые продолжали изобретать все более хитроумные устройства и с их помощью делали новые захватывающие открытия, с одной стороны, и новым поколением физиков-теоретиков, с другой стороны, которые сами никогда не пачкали руки в лабораториях, а в своих теориях использовали все более абстрактные математические формулировки. И эти напряженные отношения продолжают сохраняться. Ричард Фейнман писал: «В физике существует разделение труда: есть физики-теоретики, которые размышляют, делают выводы и угадывают новые законы, но не экспериментируют, и есть еще физики-экспериментаторы, которые проводят опыты, размышляют, делают выводы и угадывают». Редко бывает, когда истинно великий физик делает большой вклад как в экспериментальную физику, так и в теорию; возможно, последним из них был Энрико Ферми. Напряжение между двумя лагерями может быть губительным, но иногда оно может стать созидательным источником плодотворного взаимодействия.

Прогресс квантовой физики, начиная от работы Планка в 1900 году до ее всеобщего признания четверть века спустя, в период изобретения квантовой механики, заменившей классическую механику Ньютона, во многом обязан ученым «абстрактного» типа, таким как Планк, Эйнштейн, Нильс Бор, Вернер Гайзенберг, Эрвин Шредингер и Поль Дирак (рис. 4.1).

Планк никогда не чувствовал себя уютно в отношении теории, возникшей из посаженного им «семени»[7], так же, как и Шредингер, а Эйнштейн энергично боролся с некоторыми ее следствиями, но напрасно. В конечном итоге компромисс стал невозможен: классическая механика должна была безоговорочно уступить свое место новой квантовой механике 1920-х годов. Это не значит, что классическая механика совершенно устарела: теперь ее рассматривают как аппроксимацию, которая возникает из квантовой механики в ситуациях, когда h можно пренебречь без всякого риска. А ведь так оно и есть: в нашей обыденной жизни мы не думаем о квантовых явлениях, и кажется, что мир живет по законам Ньютона[8]. Однако на самом деле мы действительно живем в квантовом мире. Загадка в том, почему во многих отношениях он подчиняется детерминистическим законам старой парадигмы.

Итак, что же это такое — квантовая механика? Можно было бы ответить на этот вопрос, попытавшись перечислить правила, с помощью которых квантовая механика позволяет сделать расчеты наблюдаемых явлений в атомной физике (например, длину волны света, излучаемого натриевой лампой), или объяснить, каким образом атомы комбинируются, чтобы образовались молекулы, или даже такие проверенные свойства, как устойчивость атомов. Однако для этого потребовалось бы написать совершенно другую, а не эту книгу, в которой было бы намного больше математики! Вместо этого позвольте мне немного рассказать о кардинальном различии между основными понятиями квантовой механики и классической механики.



Рис. 4.1. Отцы-основатели квантовой физики: (а) Макс Планк (© Видеоархивы Эмилио Сегре, Американский институт физики); (б) Альберт Эйнштейн; (в) Нильс Бор (© Видеоархивы Эмилио Сегре, Американский институт физики); (г) Вернер Гайзенберг (Архив Нильса Бора, Копенгаген); (д) Эрвин Шрёдингер (© Фото Фаундлер, Инсбрук); (е) Поль Дирак (© Видеоархивы Эмилио Сегре, Американский институт физики).

В классической механике, по крайней мере, когда речь идет о ее основных постулатах, если известны силы, воздействующие на частицы системы, положение и скорость частиц в некий исходный момент времени («исходное состояние»), можно точно предсказать их последующее движение, что означает, что это движение полностью предопределено. Квантово-механистическое описание является совершенно другим. Даже исходное состояние нельзя определить таким же способом. Разница возникает из-за одного принципа квантовой механики, который пополнил глоссарий популярной терминологии, а не из-за недопонимания вообще, — принципа неопределенности Гайзенберга. Как мы увидим позже, невозможно измерить положение частицы, не нарушая ее скорость, а скорость невозможно измерить, не нарушив ее параметров. Из этого следует, что не существует способа получения точной «характеристики положения и скорости частиц в некий исходный момент времени». Между тем способ точного определения состояния системы заключается в том, чтобы предоставить данные стольких величин, сколько можно измерить, не изменяя ни одну из них.

Принцип неопределенности Гайзенберга основывается на том посыле, что процесс измерения вообще может изменить характеристики в рамках квантовой системы. Это значит, что последующее измерение некоторых других свойств не даст такого же результата, какой был бы получен, если бы первое измерение не производилось. То есть в мире классической механики достаточно было постараться, чтобы лишь *слегка* нарушить состояние системы при первом измерении и вызвать ничтожно малые последствия для второго. Но в нашем квантовом мире существует противоречие между ничтожностью помех и точностью измерения.

С целью более подробного рассмотрения предположим, что нам надо измерить положение частицы и ее количество движения. (Это выражение Ньютона просто обозначает продукт массы и скорости частицы.) Чтобы определить положение нашей частицы, можно попытаться понять, где она находится. Чтобы сделать это по возможности точно, мы будем использовать свет с короткой длиной волны точно по той же причине, по какой летучие мыши, полагающиеся на отражение звука для определения местоположения и ловли насекомых, используют высокие звуки с короткой длиной волны для своих звуковых радаров. На самом деле при использовании волн для определения положения чего-либо в пространстве обнаруживается, что чем длиннее волна, тем менее точно она воспроизводит детали. Это похоже на необходимость использования карандаша для того, чтобы нарисовать подробный рисунок. Поэтому чтобы точно измерить положение частицы, мы будем использовать короткие волны.

Но теперь возникает конфликт между нашим желанием определить точное положение частицы и нашим стремлением измерить ее количество движения. Чтобы увидеть частицу, мы должны осветить ее, что на самом деле означает — осыпать ее градом фотонов. При отскакивании от частицы они нарушат ее количество движения. Чтобы максимально уменьшить эту помеху, мы могли бы использовать только один фотон. (Нам нужно иметь

по меньшей мере один фотон.) Так как слово «видеть» означает позволить фотону вступить во взаимодействие с нашей частицей — отскочить от нее — и так как фотон ведет себя как частица, которую разрушают, он неизбежно заставит нашу частицу отскочить и тем самым изменить показатель количества движения. Чтобы сделать этот отскок минимальным — то есть изменить количество движения частицы, вызванного нашей попыткой измерить ее положение, — мы могли бы попытаться использовать фотон только с низким показателем количества движения. Согласно логике квантовой механики, это значит, что это будет фотон, соответствующий *длинной* волне света. Чтобы максимально уменьшить неопределенность положения, мы должны использовать коротковолновой свет, а чтобы максимально уменьшить неопределенность показателей количества движения, мы должны использовать длинноволновой свет. Вот в этом и состоит суть принципа неопределенности Гайзенберга.

Гайзенберг продемонстрировал, что эту неопределенность можно описать математическим способом. Он показал, что неопределенность положения, умноженную на неопределенность значения количества движения, невозможно уменьшить ниже значения постоянной Планка, разделенной на 4π. Это ограничение не просто влияет на наше знание о положении и количестве движения. Оно является всесторонним и полностью разрушает основание для осуществления мечты Лапласа. Вспомните, что в классической физике знание настоящего позволяет определить будущее; при данном исходном состоянии тела классические уравнения движения все более явно управляют его эволюцией. Но исходное состояние всегда содержит две переменные величины, такие как положение и количество движения! Следовательно, принцип неопределенности Гайзенберга означает, что мы никогда не сможем быть уверены относительно исходного состояния, или, другими словами, квантовая механика доказывает, что частица не имеет одновременно точного положения и точного значения количества движения. Мы не можем знать даже настоящее, следовательно, мы, конечно же, не можем знать и будущего.

Но что действительно позволяет нам определить квантовая механика, так это *вероятность*, и не просто в каком-то туманном и неопределенном смысле: можно точно и адекватно оценить вероятность любого полученного результата, зафиксированного при некоем данном исходном состоянии четко отрегулированной системы[9]. В особых обстоятельствах эта вероятность становится определенностью — как говорят математики, вероятность тогда имеет значение 1, то есть результат, о котором идет речь, имеет 100%-й шанс быть полученным. Но подобные обстоятельства складываются редко.

Чтобы определить вероятность какого-либо изменения в квантово-механистической системе, сначала следует вычислить так называемую *амплитуду* перехода между исходным и конечным состоянием системы. В этом случае квадрат этой амплитуды и будет вероятностью. Таким же образом, чтобы понять суть явления интерференции, так характерного для волн,

сначала рассчитывается амплитуда («размер» волны), которая в квадрате определяет значение интенсивности («силы» волны). В амплитуде интерференция проявляет себя в виде разной степени содействия образующейся волне, какую-то усиливая, а какую-то подавляя, — как говорилось ранее, подобно ряби на поверхности воды. Квантово-механистическая амплитуда имеет точно такой же волновой характер, благодаря чему явление интерференции характерно для квантовой механики, даже если применять принципы квантовой механики к таким частицам, как электроны. Теория предсказала, а опыты подтвердили, что электроны демонстрируют свойства интерференции и дифракции, характерные для волн (рис. 4.2). В самом деле, в формулировке квантовой механики, которой мы обязаны Шредингеру, описывается действие волновой механики, а в подходе Шредингера к квантовой механике суть вычислений состоит в решении его уравнения, которое представлено в форме волнового уравнения[10]. Амплитуда тогда выводится из волновой функции, то есть из решения уравнения Шредингера.

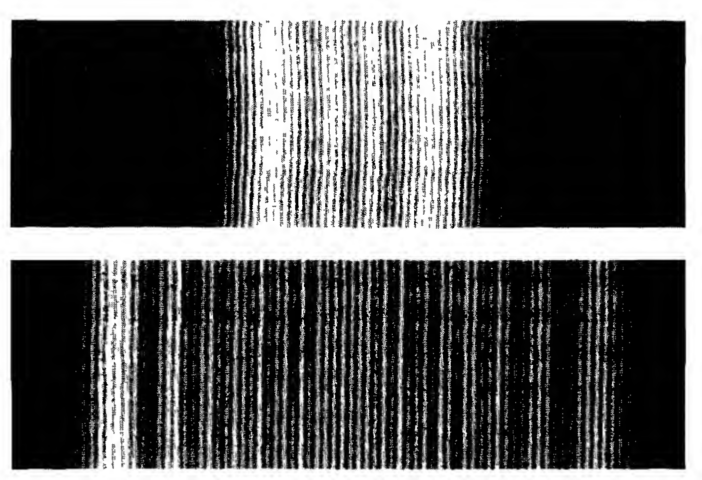


Рис. 4.2. Дифракционные картины. Верхняя картина была «нарисована» светом; нижняя — электронным лучом. (Из книг Я. Валашека «Введение в теоретическую и экспериментальную оптику» (J. Valasek, Introduction to Theoretical and Experimental Optics (John Wiley and Sons, New York, 1949) и Х. Дюкера (H. Dücker «Lichtstarke Interferenzen mit einem Biprisma für Electronen Wellen», Zeitshrift für Naturforshung, vol.10A (1958).)

В квантовой механике невозможно обнаружить материальные частицы, следующие по точно выверенным траекториям, как в механике Ньютона. Квантово-механистическая модель атома не является миниатюрной Солнечной системой, в которой электроны кружатся вокруг ядра, как планеты вокруг Солнца, хотя атомная модель Бора 1913 года была как раз такой — странная химера классических орбит, совмещенная с законами квантовой физики. В противоположность этому, состояние движения электрона характеризуется его волновой функцией, которая развертывается в пространстве. При отсутствии внешнего влияния некоторые состояния, подобно волновой функции, которая их описывает, имеют форму, остающуюся неизменной во времени, — это так называемые стационарные состояния данной системы. Внешние помехи могут привести к замене стационарных состояний, и такой переход называется *квантовым переходом*.

Понимание природы внешних помех позволяет с большой точностью оценить вероятность того, что такой переход случится.

Несмотря на отсутствие споров о том, как использовать квантовую механику, ведутся серьезные и острые дискуссии о самих ее основах. Физики все еще не могут прийти к согласию по поводу того, что *означает* квантовая механика. Я должен буду вернуться к этому вопросу позднее!

Первоначально сформулированные для описания одной-единственной частицы, эти идеи были сразу же перенесены на системы, состоящие из многих частиц. К тому времени различие между частицами и волнами стало размываться. Электромагнитное поле Максвелла, если объяснять его законами квантовой механики, продолжало проявлять волновые свойства, такие как дифракция, интерференция и т. д., а также свойства частиц. Поле связывают с квантовой амплитудой из-за присутствия *фотонов*, квантов света, дискретных частиц, каждая из которых несет в себе определенную энергию и количество движения. Противоречие между описанием отдельных частиц или волн лучше всего, вероятно, объяснить тем, что поле распространяется как волна, но взаимодействует как частица. Квантово-механистическая трактовка электромагнитного поля является примером *квантовой теории поля.* К тому же в конце 1920-х стало ясно, что подобно тому как квантовая механика применяется к электромагнитному полю и каким образом это применение связано с необходимостью анализировать движение частиц, то есть того, что в классической трактовке считается волной, явления, обычно рассматриваемые как действие частиц, например электронов, также должны связываться с квантами полей.

Если электродинамика Максвелла — теория электрического и магнитного полей, заряженных частиц и их взаимодействия — была парадигмой для классической теории относительности, так и новая квантовая электродинамика — теория электромагнитного поля с фотонами в качестве квантов, взаимодействующего с другим полем с электронами в качестве квантов, — стала парадигмой для релятивистской квантовой теории. Сами частицы, такие как электроны, следует рассматривать как кванты, материальные проявления, или *поля.* Электронное поле обеспечивает квантовую амплитуду для электрона при данном состоянии движения. Электронное поле соответствует волновому уравнению.

Луч света можно рассматривать как поток фотонов, поэтому не удивительно, что фотоны можно создавать и разрушать. При нажатии на выключатель света создаются мириады фотонов, потоком выходящих из лампы; когда они поглощаются, например сетчаткой глаза, они разрушаются. Но образовываться или разрушаться, подобно квантам полей, могут не только фотоны; то же самое характерно и для электронов. Вывод из релятивистской квантовой теории таков: частицы, подобные электронам, не являются неизменяемыми и постоянными. Их также можно создавать и разрушать! Электрон, выделенный из ядра бета-радиоактивного атома, такого как 60Co (кобальт-60, используемый как источник радиации в медицинских целях), не существовал до того момента, как произошел спонтан-

ный распад ядра (еще один пример квантового перехода) и образовалось ядро никеля. Он был создан в тот самый момент ядерного превращения.

Несмотря на тяжкие испытания, через которые прошла квантовая теория поля, а их было много — сегодня даже теория поля материальных частиц уступает теории струн в качестве базы для понимания структуры материи, — основные принципы квантовой механики устояли перед всеми вызовами и как никогда кажутся прочными.

Но мы до сих пор точно не знаем, что они собой представляют! Суть проблемы — в природе квантового перехода. Для простоты предположим, что мы рассматриваем систему, которая имеет только два разных основных состояния — все другие созданы из этих двух. Подобным образом можно описать некие реальные физические ситуации, например состояние поляризации фотона. Поляризация света была предметом исследования Томаса Янга, и эта область до некоторой степени знакома каждому, кто пользовался поляризующими солнцезащитными очками или поляроидным фотоаппаратом. Свет, отраженный от лужи с водой, поляризуется, а это значит, что он сильнее вибрирует из стороны в сторону, чем вверх и вниз. Два основных состояния поляризации фотона для удобства можно обозначить как ↔ (из стороны в сторону) и ↕ (вверх и вниз). (Любое другое состояние поляризации будет соответствующей комбинацией этих двух.) Предположим, что я ношу солнцезащитные очки со 100%-й поляризацией; тогда ↔-фотоны полностью блокируются, в то время как ↕-фотоны проходят сквозь стекло беспрепятственно (рис. 4.3). Теперь предположим, что я наклонил голову в одну сторону, поэтому вместо блокирования фотонов, поляризованных в горизонтальном направлении, очки блокируют те фотоны, которые поляризованы под углом 45° к горизонтали. Что же тогда происходит с ↔-фотоном? Согласно законам квантовой физики существует 50%-я вероятность того, что он пройдет сквозь стекло, и 50%-я вероятность, что он будет заблокирован. Само по себе это не кажется странным, так как классическая физика предполагает тот же результат, и вы можете убедиться в этом сами, посмотрев на отраженный от воды свет сквозь поляризующие солнечные очки. Но давайте задумаемся о том, что это значит для одного-единственного фотона. До того как он столкнулся с перемещенными солнечными очками, он был ↔-фотоном, а любое состояние поляризации фотона можно выразить в виде приемлемой комбинации ↔ и ↕. (Не было ничего особенного в нашем выборе этих двух основных состояний, и мы также могли бы выбрать вместо них два перпендикулярных состояния с углом наклона к горизонтали в 45°. Тогда наш ↔-фотон сочетался бы с этими двумя состояниями, с равными амплитудами для двух компонентов, подтверждая 50%-ю вероятность прохождения сквозь очки.)

А теперь предположим, что я надел *еще одну* пару солнечных очков под таким же наклоном. Помните, что эти очки обеспечивают 100%-ю защиту от солнца, так что если фотон пройдет сквозь первые очки, вторые не будут для него препятствием. Это может означать только то, что, если фотон прошел сквозь первую пару очков, его состояние было таким, что он уверенно

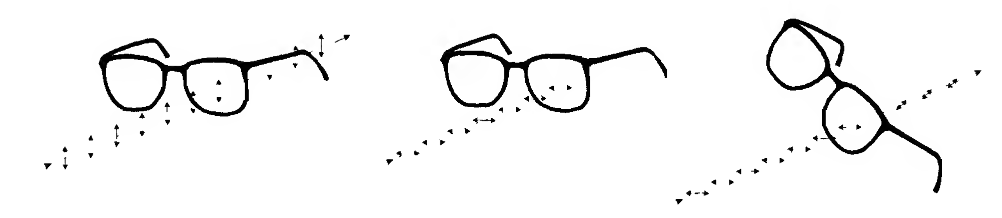


Рис. 4.3. Фотоны и солнечные очки. Слева: вертикально поляризованный свет (↕) свободно проходит сквозь стекла солнечных очков. В середине: горизонтально поляризованный свет (↔) заблокирован. Справа: горизонтально поляризованный свет проходит сквозь наклоненное стекло, но с меньшей интенсивностью, а выходит поляризованным под наклоном

прошел сквозь вторые очки, а это значит, что его состояние больше не было таким, в котором он начал свое движение: он *совершил квантовый переход* к состоянию, которое позволяет легко пройти сквозь наклоненные стекла очков, — обозначим его в виде наклонной стрелки ⤢. Мы можем описать то, что произошло, допуская, что фактически наклоненные солнечные очки обусловливают поляризацию, и задаваясь вопросом «Это состояние ⤢?» И если ответ утвердительный, последующее измерение снова покажет тот же положительный результат. Исходное состояние было ↔, на которое было наложено состояние ⤢, а другое состояние было вызвано наклоном головы в противоположную сторону — обозначим его стрелкой ⤡. После первого «измерения», если фотон прошел сквозь очки, он был бы в состоянии ⤢, а если нет — то в состоянии ⤡. Как будто процесс измерения вынудил фотон «выбирать». Волновая функция фотона до измерения была комбинацией ⤢ и ⤡; *после измерения*, если он прошел сквозь очки, она была только ⤢. Волновая функция *разрушилась*. Этот коллапс волновой функции происходит всякий раз, когда осуществляется измерение. Он находится в центре нерешенных споров об основах квантовой механики, причем в последние годы эти споры разгорелись еще сильнее благодаря глубоким теоретическим исследованиям Джона Белла и новой экспериментальной технике, которая позволила проводить более точные опыты. Эти испытания подтверждают, что законы квантовой механики действительно работают, а законы классической механики — нет.

Очевидно, не подвергшаяся стороннему воздействию система со временем эволюционирует — так, как это предсказано в уравнении Шредингера. Само это уравнение является не менее детерминистическим, чем уравнения движения, сформулированные классической физикой. Его решение (волновая функция), дает полное описание системы, насколько это возможно. Но в целом оно не предопределяет результат любого измерения, которое может быть выполнено в рамках этой системы; оно только приписывает определенные вероятности возможным результатам. Однако если измерение *сразу* же повторить, оно *наверняка* даст такой же результат, как и в первом случае. Это может означать только то, что в связи с воздействием

самого процесса измерения произошло *нарушение непрерывности* (или, по меньшей мере почти незаметное быстрое изменение) волновой функции. Так или иначе, в какой-то момент измерительного процесса волновая функция прекратила свой ровный, детерминистический путь развития, согласно уравнению Шредингера, и резко поменялась.

Это явление представляется довольно загадочным, даже для той простой ситуации, которую я попытался описать. Но оно становится еще более трудным для понимания, если задаться вопросом: «Когда производить измерение?» Шредингер предложил знаменитую и одновременно провокационную иллюстрацию этой загадки, которая может создать впечатление, что он недолюбливал кошек! Даже если сначала законы квантовой механики были сформулированы для систем на атомном уровне, нет причины против их применения и в макроскопических системах. На самом деле их следует использовать и там, если мы уверены, что квантовая механика имеет всеобщее и универсальное обоснование. (В настоящее время многочисленные эксперименты подтверждают ее обоснованность, и ни один эксперимент не опроверг этот постулат.) Поэтому давайте рассмотрим макроскопическую систему, общий алгоритм действия которой определяется неким атомным процессом. В конечном итоге *любой* анализ атомной системы должен быть аналогичным этому, так как наша аппаратура будет макроскопической, а счетчик детектора, или движение стрелки на шкале, представляют некий вид общего алгоритма действия, о котором и идет речь. Атомный процесс в примере Шредингера представляет собой радиоактивный распад атома, и мы можем предположить, что у атома имеется 50%-я вероятность распада за один час. Признаки распада атома должен обнаружить соответствующий прибор, который, следовательно, имеет 50%-й шанс отреагировать в течение часа. Но теперь начинается самое интересное! Прибор, атом и все остальное нужно поместить в герметически закрытый ящик; прибор соединен с устройством, которое должно выпустить в ящик смертельную дозу цианида, а вместе с радиоактивным атомом, прибором и склянкой с цианидом в ящик помещают кошку. Ящик герметично закрывают на один час, после чего подтверждается 50%-я вероятность того, что произошел распад атома — прибор отреагировал на это, а бедная кошка погибла. Однако существует также 50%-я вероятность того, что кошка жива-здорова (по доброте своей мы поставили в ящик блюдце с молоком и другое угощение). Теперь откроем ящик и находим в нем кошку — живую или мертвую. Теперь Шредингер предлагает нам задаться вопросами: когда производить измерение (кошка мертва/кошка живая)? Когда смотреть на результат? Когда распадается атом? Предположим, мы рассматриваем волновую функцию, чтобы получить представление о состоянии атома: когда происходит ее коллапс? Или, допустим, мы рассматриваем волновую функцию, описывающую все содержимое ящика вместе с кошкой: когда происходит ее коллапс? Довольно трудно определить состояние атома через час по характеристикам волновой функции, которая до измерения представляет собой наложение двух компонентов, причем каждый действует с одной и

той же амплитудой, один из которых — еще не распавшийся атом, а другой — атом распавшийся. Но можем ли мы рассматривать волновую функцию, представляющую собой такое наложение мертвой кошки и живой кошки? Действительно ли мы готовы согласиться с тем, что пока мы не открыли ящик и не «выполнили измерение», внутри ящика существует своего рода наложение мертвой и живой кошки, причем каждая имеет одинаковую амплитуду по прошествии часа? А если нет, то где нам следует сделать то, что Джон Белл назвал «неустойчивым разрывом» между атомной системой, действующей по законам квантовой механики, и классической кошкой? Не следует ли нам самим рассматривать себя как некие квантовые системы?

Конечно, никто еще не видел квантового наложения живой и мертвой кошки. Но мы *действительно* наблюдали квантовое наложение ↕-фотона и ↔-фотона! И пока не сделано измерение, чтобы установить, был это тот или другой фотон, это наложение является его квантово-механистическим состоянием. Точно так же, если у меня есть радиоактивный атом и я анализирую его состояние спустя некоторое время, его положение действительно будет представлять собой наложение не распавшегося и распавшегося атомов, пока не будет произведено измерение с целью определить, к которому из двух типов он принадлежит. Процесс вскрытия ящика Шредингера и является, по сути, таким измерением. Но что же случилось с кошкой? Разрешение этого парадокса продолжает вызывать споры, но я согласен со следующим доводом, который довольно популярен. Эксперимент в ужасном ящике устанавливает зависимость между не распавшимся атомом и живой кошкой и между распавшимся атомом и мертвой кошкой: если атом не распался, кошка остается живой, но если атом распался, увы, бедная киска мертва. Как говорится, состояние атома и кошки *запутано.* Странные последствия квантовой «запутанности» вынуждают нас никак не воздействовать на эту систему, изолированную от окружающей обстановки (отсюда ящик). Теперь атом очень хорошо изолирован от окружения — трудно повлиять на распад радиоактивного атома. Но кошка (да по большому счету и любой макроскопический объект) находится в постоянном взаимодействии со всем окружающим, например, через столкновение с молекулами воздуха. Хотя эти столкновения не убьют живую кошку и не оживят мертвую, они способны изменить квантовое состояние кошки. Следовательно, их достаточно, чтобы разрушить — и тоже очень быстро — связность, необходимую для предметного разговора о квантовом наложении состояний макроскопического объекта, подобного кошке. Именно это быстрое нарушение связности, вызванное взаимодействием с окружающей средой, создает различия между микромиром атома или фотона, в котором действительно наблюдаются квантовые наложения, и макромиром кошки или солнцезащитных очков, в котором эти наложения осуществляются. Единственным бесспорным выводом из этого запутанного состояния микромира атома и макромира кошки является зависимость между состоянием атома и состоянием кошки.

Эйнштейн так и не примирился с неопределенностью, составляющей сущность квантовой механики. Его беспокойство, вызываемое «копенгаген-

ской» интерпретацией квантовой механики, которую так защищал Нильс Бор, привело к обмену мнениями в 1927–1931 годах. между этими двумя титанами физики двадцатого века с выражением полного взаимного уважения. Пытаясь найти слабое место в Копенгагенской интерпретации, Эйнштейн предложил провести еще более «хитроумные эксперименты», чтобы устранить квантовую неопределенность. Бору удалось найти изъяны в каждом из них, и в конце концов ловко использовать общую теорию относительности самого Эйнштейна, чтобы противодействовать его более изощренным предположениям. Несмотря на свою уступку по этому вопросу, Эйнштейн продолжал исследовать глубинные последствия экспериментов квантовой механики, и особенно конфликт между понятием *объективная реальность*, которая предполагает, что наблюдаемый физический объект имеет значения, не зависящие от измеряющего его наблюдателя, и что квантовая механика может приписывать этим значениям только некую степень вероятности. Эйнштейн думал, что, возможно, квантовая механика является *неполной* — возможно, существуют «скрытые переменные значения», которые, если их обнаружат, возродят классический детерминизм.

В 1935 году совместно с Борисом Подольским и Натаном Розеном, он написал очень важную и вызывающую озабоченность работу, которая вызвала полемику из-за очевидного парадокса. Авторы показали, что можно поставить воображаемый эксперимент — то есть эксперимент, реализуемый в принципе, если не на практике, — с помощью которого можно было бы уверенно предсказать как положение, так и количество движения частицы, хотя принцип неопределенности Гайзенберга требует, чтобы точные сведения об одном из этих показателей противоречили точным сведениям о другом. Если положение и количество движения являются характеристиками объективной реальности, вся теория должна служить базой для описания результатов любого эксперимента, хотя в данном случае она терпит фиаско. Следовательно, или квантовая механика еще не завершена как стройная система, то есть существуют невыявленные переменные, которые еще предстоит открыть, или концепция «объективной реальности» должна быть радикально пересмотрена. Воображаемый эксперимент, предложенный Эйнштейном, Подольским и Розеном, был простым в теории, но вместе с тем нереальным на практике. Альтернативный вариант их эксперимента был придуман Дэвидом Бемом, который предложил использовать поляризацию фотонов, а не положение и количество движения частиц для иллюстрации парадокса, как это сделал я, чтобы объяснить основные принципы квантовой механики. Он также разработал остроумную теорию, которая включала скрытые переменные, но в других отношениях была совместима с прогнозами квантовой механики относительно поведения одной нерелятивистской частицы. Но все же для ответа на этот вопрос не было экспериментальной базы. Существуют ли скрытые переменные величины?

Совершенно новый подход к этой теме был предложен в 1964 году Джоном Беллом, который дал простой, но глубокий анализ последствий

введения этих скрытых переменных. Он рассмотрел возможности, определяющие меру корреляции между состояниями поляризации двух фотонов в процессе их измерения в простом эксперименте, подобного тому, что был описан Бемом. Но в своем анализе он допускал наклон поляризационных фильтров под любым углом относительно друг друга. Квантовая механика делает определенные прогнозы для таких корреляций. Белл сделал анализ вариантов прогнозов в отношении любой теории со скрытыми переменными величинами, совместимой со специальной теорией относительности. (Чтобы быть совместимой со специальной теорией относительности, установка прибора для измерения поляризации в одном луче не может влиять на результат, получаемый в другом луче, так как иначе это подразумевает влияние, распространяющееся быстрее, чем скорость света.) Затем Белл смог доказать, что некая комбинация вероятностей не может быть больше 2 — так называемое неравенство Белла. Однако согласно прогнозу квантовой механики эта комбинация может превышать 2 и на самом деле быть равной $2\sqrt{2}$ (около 2,8) при соответствующем положении угла между поляризационными фильтрами. Таким образом, между прогнозом теорий со скрытыми переменными, совместимыми со специальной теорией относительности, и прогнозом в отношении стандартной квантовой механики существует острое противоречие. Затем эта проблема стала поводом для проведения эксперимента: сохранится неравенство Белла или нет? Опыты проводил Ален Аспект и его коллеги в Париже[12], а сам принцип неравенства Белла был усовершенствован и обобщен. Результаты заметно отличались от прогнозов теорий со скрытыми переменными, но абсолютно совпадали с прогнозами квантовой механики.

Те же самые успехи в развитии измерительной техники, которые позволили Аспекту проверить наблюдения о неравенствах Белла, а также удивительные возможности приборов, улавливающих отдельные атомы и манипулирующих ими, указали нам путь к захватывающим перспективам будущих опытов. Квантовая запутанность, такая как между фотонами в экспериментах Аспекта, является основой для надежного способа шифрования и передачи информации, что представляет огромный коммерческий интерес. А наложение состояний (мертвая кошка/живая кошка — или, более легкий для реализации, распавшийся атом/невредимый атом), являющееся фундаментальной характеристикой квантовой механики, позволяет создать новый вид компьютера — квантовый компьютер[13].

Еще одной актуальной темой для исследований, которые наверняка продолжатся в следующем веке, является *квантовая космология*: использование квантовой механики и ее методов для *всей Вселенной*. Для этой цели больше невозможно отдельно рассматривать наблюдаемую систему и внешнего наблюдателя. Не существует такого внешнего наблюдателя, причем настолько макроскопического, чтобы удовлетворять законам классической физики, который способен отслеживать ситуацию в подсистеме, к которой мы применяем законы квантовой механики. Кроме того, я считаю, что нет смысла рассматривать *множество* Вселенных, с самого начала пребыва-

ющих в одном и том же состоянии, чтобы придать смысл утверждению о том, что данное свойство обязательно должно проявиться. Несмотря на это, такой подход характерен для некоторых квантовых космологов. Мне представляется, что в нашем мире любое утверждение является или истинным или ложным. Постановка подобных проблем способствует раздвижению границ физической теории. Они становятся актуальными, так как эксперимент и наблюдение указывают на удивительно тесные связи между физикой субатомных, субнуклеарных частиц и физикой космоса в самом грандиозном масштабе. По-видимому, квантовые эффекты, имевшие место во Вселенной на раннем этапе развития, являются теми семенами, из которых образовались галактики (более подробно об этом в главе 11). Исследования в области космологии и космогенеза в такой же степени зависят от понимания законов квантовой механики, в какой они зависят от знания физики атомов — сюда относятся и химические процессы, и жизнедеятельность всех систем.

ГЛАВА 5

ПОРЯДОК ИЗ ХАОСА

Возникновение структуры

Леонардо да Винчи сделал много удивительных рисунков бурной воды, водоворотов и омутов, водной ряби и волн (рис. 5.1).

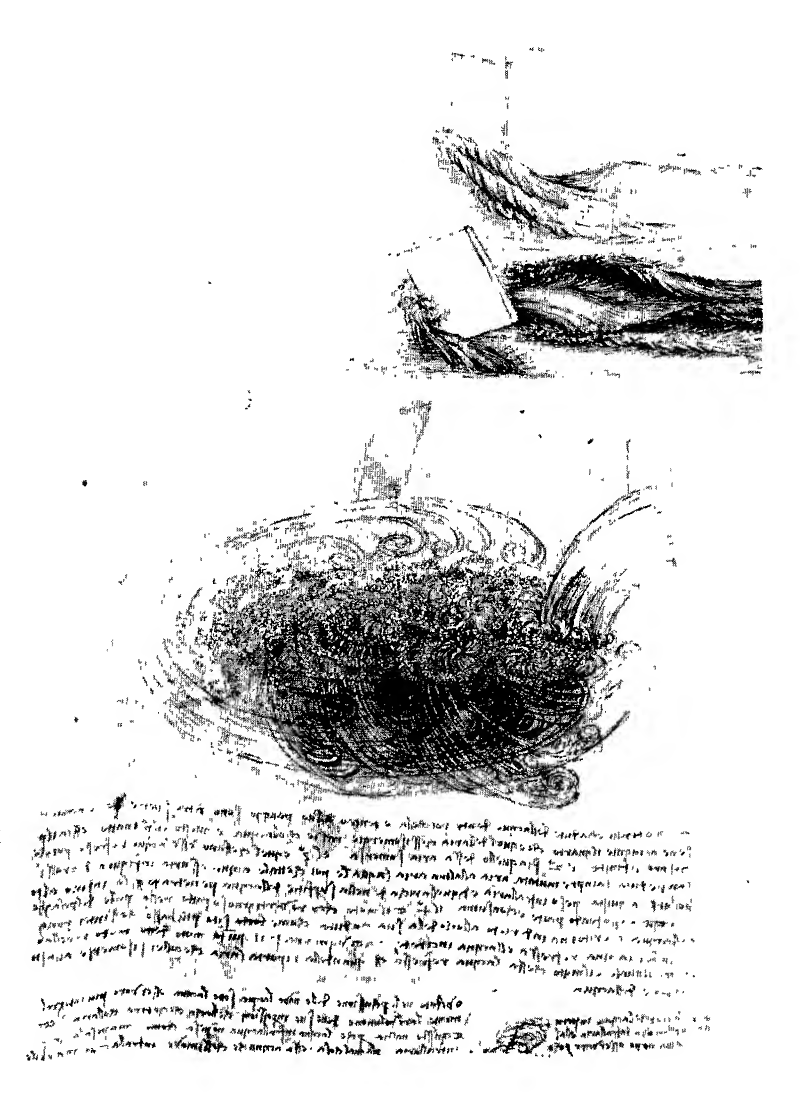


Рис. 5.1. Страница из записной тетради Леонардо да Винчи с рисунками омутов в текущей воде. («Вода». С. 1507-9 из Королевской коллекции ©2001, Ее величества королевы Елизаветы II)

Эти рисунки демонстрируют его удивление процессу становления формы и структуры, возникновению порядка из хаоса. Даже в самых яростных океанских штормах можно обнаружить определенные их виды и повторяемость. Как и многое другое в физике, изучение гидродинамики, или воды в движении, во многом обязано Ньютону. Поэтому давайте пока отложим в сторону неопределенности квантовой механики и вернемся к детерминизму классических законов движения. Их использование для предсказания бури, даже в чайной чашке, когда в ней взбалтывают воду, является крайне сложной задачей. Для начала мы могли бы рассмотреть движение отдельной капли воды, отталкиваемой ее «соседками». Можно ожидать, что движение соседней капли будет таким же, поэтому, если они стартовали близко друг к другу, они останутся в этом положении, по крайней мере, в течении некоторого времени. Именно это и происходит в спокойном потоке воды, например в мирно текущем канале. Но если поток ускоряется или встречает препятствия, он становится менее равномерным. По мере увеличения турбулентности капли, стартовавшие рядом друг с другом, быстро отделяются. Движение становится *хаотичным*. Турбулентные гидродинамические потоки являются хаотичными, но не беспорядочными (рис. 5.2).



Рис. 5.2. Примеры турбулентных потоков, в которых видны проявления регулярной повторяемости формы в хаосе. (Фотографии потоков в мыльной пленке сделаны Маартеном Рютгеном (в то время он работал в Государственном университете штата Огайо), Сяо-Лунь Ву и Уолтером Гольдбергом (Университет Питсбурга).)

Планета Юпитер является самой большой в Солнечной системе. В телескоп видно, что его диск покрыт темными и светлыми многокрасочными полосами — это облака в самых верхних слоях атмосферы из метана и аммиака, которые совершают круги вокруг планеты примерно за 10 часов. Эти облака

разрываются штормами. И все же при каждом обороте можно наблюдать одно специфическое явление, которое сохраняется в течение последних ста лет. Это Большое Красное Пятно, которое является антициклонической системой — связной структурой, возникающей из бурь и турбулентности — и удивительным примером возникновения порядка из хаоса (цветная иллюстрация 11).

Хаос случается не только в комплексных явлениях, подобных турбулентности. По-видимому, при всей правильности детерминизма классической физики хаотичное поведение является скорее нормой, чем исключением, если только обратить должное внимание на *нелинейность.* В течение поколений большая часть исследований механики сосредоточивалась на линейных системах, или на линейных приближениях к более реальным ситуациям. В линейных системах, из которых многие присутствуют в природе, небольшие изменения приводят к незначительным последствиям. Рябь на воде, вызванная легким бризом, может быть описана с помощью линейной теории, но разбивающиеся о берег волны не могут. Только в последние двадцать лет были найдены способы трактовки некоторых математических затруднений, которые нелинейность привносит в реалистическое описание природных явлений. Во многих случаях великолепно связанные структуры, подобные Большому Красному Пятну, возникают из нелинейных взаимодействий очень сложных систем. И это вопреки хаосу в четко отлаженной структуре движения, который делает практически невозможным отслеживание или прогнозирование лежащей в его основе динамики детерминистическим способом. Связанные структуры, возникающие из этого хаоса деталей, сами подчиняются описательным законам, которые находят применение в очень разных системах, причем настолько разных, насколько атмосфера Юпитера отличается от распространения эпидемий среди населения. «Новая наука» о хаосе апеллирует к этим структурам и их законам.

Что может быть регулярнее движения планет вокруг Солнца, Луны вокруг Земли? И все же оно тоже может становиться хаотичным. Вообразите упрощенную модель Солнечной системы только с тремя планетами — назовем их Солнце, Земля и Луна. Начав движение под действием взаимной силы тяготения, они могут в течение некоторого времени подражать обычной манере своих реальных двойников, когда модель Земли кружится по постоянной орбите вокруг модели Солнца, а Луна по орбите вокруг — Земли. Но с течением времени это движение может измениться так, что Земля и Луна начнут независимо друг от друга двигаться по орбите вокруг Солнца, затем движение возвращается назад, на прежние орбиты; и так попеременно от одного вида движения к другому. Вся последовательность является полностью детерминистической: будут ли происходить такие чередования и с какой частотой, существенно зависит от исходных условий. Еще большую тревогу вызывает вероятность того, что наша модель Луны, или даже модель Земли, могут во время своего движения навсегда покинуть пределы влияния Солнца. Это может случиться даже в нашей Солнечной системе! Стабильность системы находится в такой тонкой зависимости от параметров движения, что, хотя мы с высокой степенью точности и уверенности можем определить движение пла-

нет в нашей собственной Солнечной системе за сотни миллионов лет — и, кажется, ни одна из них не собирается «убегать» — со временем накапливаются некоторые неопределенности, и прогноз становится ненадежным. Мы не можем сказать с уверенностью, что стабильное движение планет будет продолжаться бесконечно[1]. Это шокирующее заключение касательно стабильности Солнечной системы было сделано королем Швеции Оскаром II в 1890 году и с него началось изучение детерминистического хаоса. Это еще одна сторона того, что называется хаосом; в случае турбулентной гидродинамики признаком хаоса были расходящиеся траектории капель, начавшие движение в близком соседстве друг с другом, в то время как здесь это отклонение в функционировании системы в целом, которое демонстрирует предельную чувствительность к исходным условиям, что является характеристикой хаоса.

Чтобы лучше понять эту чувствительность к исходным условиям, можно воспользоваться аналогией. Когда пекарь хочет испечь круассаны, он или она раскатывает кусок теста в форме овала, который в один и три четверти раза длиннее, чем в ширину (математически педантичный пекарь сделает эту форму в $\sqrt{3}$ раз длиннее, чем в ширину). Затем тесто смазывают маслом и сворачивают втрое, чтобы получить овал прежней формы (только меньше). Затем кусок теста поворачивают под прямым углом и раскатывают до тех пор, пока не получат овал того же размера и формы, как в первый раз; и затем складывают, поворачивают и раскатывают — снова и снова. Благодаря этой процедуре кусок масла сливается с тестом. Добавляют еще масла и снова раскатывают, затем объединяют с тестом. Каждый кусок масла был раскатан и сжат, вытянут в одну и другую сторону. Его объем не изменился, но оно теперь пропитывает все тесто. Можно проследить положение каждой частички масла от цикла к циклу, от складывания теста до его раскатывания. После каждого такого цикла ее положение можно точно вычислить: конечно, мы подразумеваем, что пекарь на самом деле является математиком и раскатал тесто с безупречной точностью. Итак, цикл за циклом, частичка масла появляется то здесь, то там, ее положение смещается, или трансформируется, согласно точным, предсказуемым законам. Пекарь называет это смешиванием, и математики тоже называют это смешиванием. Как нетрудно понять, частичка масла точно в центре прямоугольника остается на том же месте после каждого цикла. Такая точка называется фиксированной точкой трансформации (есть две другие фиксированные точки этой трансформации, одна в верхнем левом углу прямоугольника, а другая — в правом углу, противоположная по диагонали). Если частичка масла не находится в одной из фиксированных точек, она будет передвигаться, прокладывая себе путь сквозь тесто; и две частички масла, начавшие движение близко друг к другу, очень скоро расходятся далеко в стороны (рис. 5.3).

Состояние даже сложной динамической системы может быть представлено в виде точки (то, что называется *фазовым пространством*), и эта точка движется по мере развития системы во времени. Для простой системы может потребоваться всего лишь одна переменная величина, чтобы определить ее конфигурацию, и еще одна (представляющая сопряженное ей количество



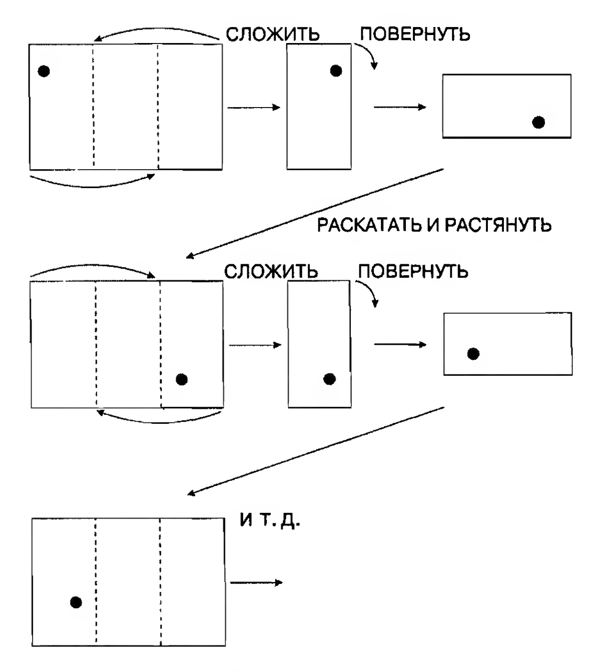


Рис. 5.3. Путь кусочка масла, добавленного в тесто для круассана

движения), чтобы определить, как быстро изменяется переменная величина этой конфигурации. Тогда фазовое пространство будет двухмерным и может быть представлено в виде плоскости. Состояние системы в этом случае похоже на положение частицы масла в тесте, и движение системы перемещают ее в этой плоскости, как манипуляции пекаря перемещают частицу масла в тесте.

Для более сложных систем с их фазовым пространством потребуется более двух переменных величин. К счастью, идея многомерного фазового пространства не выводит математиков из равновесия, но они, как и обычные смертные, могут столкнуться с трудностями при ее описании. Одним из способов фиксации основных свойств траекторий фазового пространства является использование среза Пуанкаре: из всех переменных величин конфигурации и сопряженных количеств движения выбирают и выделяют только два показателя. Они определяют плоскость, которая прорезается сквозь фазовое пространство, и наша траектория, описывающая движение исследуемой системы, будет пересекаться с этим срезом — снова, снова и снова. Карта этих точек пересечения помогает изобразить эту траекторию (рис. 5.4).

Еще одно изображение (проекционная карта), обладающее различными свойствами, может быть получено проецированием траектории на такую поверхность. Это похоже на работу радиолога, показывающего хирургу орган с разных сторон либо способом томографического сечения, либо непосредственным фотографированием затемненного участка. Так же, как схема действий пекаря подтверждает правило, согласно которому частица масла переместится из одного слоя в другой, так и детерминистические уравнения

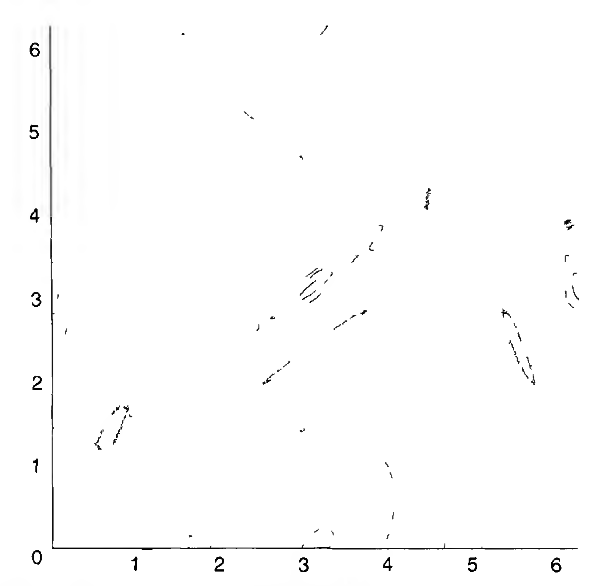


Рис. 5.4. Форма трехмерной кривой может быть воспроизведена по точкам ее пересечения с плоскостью, которая прорезается сквозь нее. Точки в этом срезе Пуанкаре отмечают последовательные пересечения с плоскостью траекторий, прочерченных в фазовом пространстве динамической системой. Непрерывные овальные линии изображают размеренное, нехаотичное движение. Но разброс точек представляет «единое» хаотичное движение, возникшее из-за слегка отличающихся исходных условий. (Огромная благодарность д-ру Франко Вивальди, «Куин Мери», Лондонскому университету.)

движения для динамической системы выводят правило, которое связывает последовательные точки траектории на срезе Пуанкаре.

Последовательные точки на срезе Пуанкаре являются близкими аналогами последовательных положений частицы масла при различных действиях пекаря. И снова у среза Пуанкаре могут быть фиксированные точки, которые соответствуют траектории, постоянно возвращающейся в то же самое место каждый раз, когда она пересекает срез. Траектория может либо поочередно менять свое положение между двумя точками на последовательных пересечениях, либо «скакать» между гораздо большим числом точек, прежде чем вернуться к первому пересечению. В таких случаях движение является периодическим и будет повторяться снова и снова, как маятник, качающийся взад и вперед. Периодическое движение — это движение, которое повторяется; оно может быть комбинацией двух или более свободных колебаний, как ритмы барабанщика, играющего три против пяти. Если свободные колебания не имеют частот, соотнесенных друг с другом коэффициентом целых чисел, движение будет *квазипериодическим*. Периодические траектории и их квазипериодические родственники наматывают свой путь по поверхностям в фазовом пространстве, причем поверхности имеют форму тора (тор — это поверхность в форме кольца, как буек, или, если вернуться в пекарню, как валик). Для большинства динамических систем есть другие траектории кроме периодических

или квазипериодических и они прокладывают свой путь сквозь фазовое пространство, проходя на бесконечно малом расстоянии от правильных торов и друг от друга, — настоящий клубок движений. Это хаос, и это не является чем-то редким и экзотичным, так же, как не является свойством только избранных систем. Это широко распространенное свойство встречается у большей части динамических систем при широком спектре их параметров.

До настоящего момента я сознательно умалчивал о еще одном общем свойстве реальных динамических систем: *трение*, или некий похожий механизм, который забирает энергию у системы и отдает ее окружению. Из-за трения система, предоставленная сама себе, в конечном итоге устанавливается в некое положение равновесия: качающийся маятник в конце концов останавливается. Но мы можем поддержать ход системы, питая ее энергией, управляя ее движением таким же способом, как маятник в старинных часах продолжает качаться благодаря толчкам анкерного механизма, управляемого опускающейся гирей. И опять-таки это движение можно описать траекторией в фазовом пространстве. Нам обычно хочется понять его поведение после того, как оно стабилизируется, освободившись от временных воздействий, вызываемых «включением» приводного механизма, который компенсирует потерю энергии окружению через трение. Как маятник в часах, система может стабилизироваться до равномерного периодического движения, и, по-видимому, не имеет особого значения, каким способом мы запускаем маятник; в конечном итоге движение оказывается почти таким же. При таком движении траектория возвращается к своему «магниту» — в данном случае к периодической орбите в фазовом пространстве, по которой траектория совершает полный цикл один раз в секунду, то есть каждый тик-так. Подчиняясь принципу такого притяжения, с периодом Т, который в качественном отношении остается неизменным при изменении какого-нибудь физического параметра, пока дальнейшее небольшое изменение в этом контрольном параметре не вызовет состояние неустойчивости, колебание, проявляющееся в переходе от регулярного боя в период Т к бою, при котором чередующиеся удары отличаются некоей регулярностью, и система теперь приближаются к своему месту притяжения с периодом, близким к 2Т. Это называется бифуркацией (раздвоением), и последующие изменения параметра управления могут привести к дальнейшей бифуркации и дальнейшим удвоениям периода. В большинстве динамических систем последствия таких удвоений периода приводят в конечном итоге к хаосу. Как показал Александр Шарковский в 1964 году, такие бифуркации в непрерывных отображениях демонстрируют уже ранее известные свойства, что само по себе удивительно, а в 1978 году Митчелл Файгенбаум обнаружил, что каскад переходов на пути к хаосу обладает некоторыми уже известными *универсальными* свойствами. Детали системы, которые могут быть крутящимися потоками в конвекционной жидкости или колебаниями в электрическом токе, вероятно, не имеют значения. Идентичные числа характеризуют, например, коэффициент параметра управления для последовательных удвоений периодов. Иначе говоря, существуют универсальные правила для перехода от порядка к хаосу.

А что же с самим хаосом? Траектория хаотичного движения не достигает предельного цикла, как траектории в периодическом движении. Она может совершать петлевое кружение вблизи какого-то участка фазового пространства, обманчиво напоминающего периодическое колебание с регулярным повторением какого-нибудь свойства, но затем может неожиданно перейти к какому-то другому периодическому движению с совершенно иными свойствами. У администраторов есть игрушка, которая очень хорошо это иллюстрирует. Маятник, способный свободно качаться в любую сторону, висит над некоей плоскостью, в которой скрыт электромагнит. Этот магнит время от времени дает толчок маятнику, обеспечивая его колебание, а три дополнительных магнита тянут маятник в разные стороны. В результате получается хаотичное движение.

Пока наблюдатель рассеянно смотрит по сторонам, пытаясь угадать, в какую сторону качнется маятник, сфера хаоса бросает вызов в отношении прогнозирования изменения климата и погоды. Эта система является настолько сложной и необходимо столько динамических переменных для исчерпывающего описания температуры, скорости ветра, облачности, выпадения осадков и т.д., даже в пределах небольшого региона, что существенную роль приобретает адекватное моделирование, некое приблизительное описание. Разрабатывая такую модель, важно передать в ней основные свойства. В 1963 году Эдвард Нортон Лоренц использовал очень простой комплект из трех уравнений, чтобы сформулировать модель синоптических ситуаций, которая могла бы сымитировать динамический поток траекторий в фазовом пространстве, подобных тем, которые описывают реальное развитие синоптической системы. Он использовал уравнения, впервые использованные Барри Зальцманом для описания вида движения жидкости, названного конвекцией Бернарда Райли, но смог продвинуться дальше Зальцмана в исследовании их числовых решений благодаря возможностям более совершенной вычислительной техники. Он также смог распознать почти универсальные возможности использования тех результатов, которые были получены при решении уравнений. Как он и ожидал, траектории прочертили кривые в его трехмерной модели фазового пространства. Уравнения содержали контрольные параметры, числовые константы, которые он мог корректировать от одного цикла вычислений до другого. Он нашел приемлемые решения, которые применялись к ограничительным циклам регулярно повторяющегося действия. Но при изменении контрольных параметров возникал новый вид «магнита». Траектория вычерчивала кривую, которая по форме все больше приближалась к необычной поверхности, состоящей из двух лепестков; совершая петлевое движение, как карандаш у рассеянного рисовальщика, она вычерчивала один лепесток, затем перескакивала к другому лепестку, затем возвращалась к первому — совсем как муха, беспорядочно кружащаяся сначала вокруг одного абажура, затем вокруг другого.

Но при всей видимости хаотичного поведения, движение не является произвольным: уравнения являются детерминистическими. Два решения, которые сначала очень похожи и в течение некоторого времени остаются

аналогичными, в какой-то момент начинают расходиться в стороны так, что через небольшой промежуток времени из поведения одного (скажем, это решение показывает движение на лепестке А) невозможно заключить, каким может быть поведение другого (находится оно на лепестке А или В?). Это опять хаос. А двухлепестковое место притяжения, к которому приближаются траектории, представляет собой знаменитый «*странный магнит*» Лоренца. Считается, что такие «странные магниты» могут быть реальными характеристиками ежедневной погоды и долгосрочного климата (цветная иллюстрация 12). Вот почему мы можем предсказывать погоду с приемлемой точностью на период до нескольких дней, но потом наши прогнозы становятся все менее надежными. Выпадет ли снег 1 января? Эволюция данной модели является настолько чувствительной к исходным условиям или к последующим помехам, что машущая крыльями бабочка может изменить прогноз, «смахнув» погоду с траектории, которая ведет к выпадению снега в новогоднюю ночь, на траекторию, ведущую к ситуации отсутствия снега в этот день. (Лоренц фактически придумал выражение «эффект бабочки», чтобы подчеркнуть важность этой особой чувствительности к исходным условиям, выраженной динамическими потоками вблизи «странного магнита».) Поэтому мы можем только рискнуть и выдвинуть свои версии или положиться на случай.

Прогноз погоды является трудной работой, потому что даже если бы мы смогли вывести уравнения, управляющие изменениями изо дня в день, они будут подвержены хаотичной чувствительности к исходным условиям: деталям погоды сегодняшнего дня. И все же мы можем быть достаточно уверены в том, что мы представляем диапазон возможностей для прогнозирования погоды на завтра, или на следующую неделю, или даже на следующий год. Теперь предположим, что лежащие в основе уравнения сами изменились, а это означает, что климат сам по себе подвержен изменениям. Это может случиться естественным образом, как это было в период оледенения. Небольшие изменения, накапливающиеся в течение многих лет, могут внезапно вызвать кардинальное изменение погодной системы, так как она «перескакивает» совершенно на другую траекторию. Такое изменение может быть также вызвано невольным вмешательством человека, и именно поэтому физики так озабочены причинами глобального потепления, хотя мы не можем знать его последствий. Намеки, которые мы получаем от необычного поведения океанского течения Эль Ниньо, или вызывающая тревогу дыра в озоновом слое над полюсами могут указывать как раз на такой сдвиг в глобальном климате.

«Странные магниты» являются, в сущности, универсальным свойством фазового пространства для реальных динамических систем. Как правило, имеют место низкоамплитудные, нерегулярные внешние помехи или удары, но, несмотря на это, система демонстрирует общую долговременную стабильность своей жизнедеятельности. Каким бы ни было ее исходное состояние, она быстро стабилизируется, приближаясь к «магниту», который управляет характером ее движения. Сам «магнит» является *устойчивым,* изменяясь совсем чуть-чуть — когда немного изменяется система; эти решения — отдельные траектории — отражают рассматриваемое нами хаотичное поведение, а не

общие модели, которые они создают в фазовом пространстве. Хаотичное динамическое поведение демонстрируют не только физические системы. Такие же математические модели, такие же уравнения и такая же временная эволюция с предельными по циклу «магнитами» и «странными магнитами» были использованы для описания сердцебиения или чередующегося баланса между хищниками и жертвами в экологически чистой среде обитания. Было также отмечено, что им подчиняются циклы возникновения паники на фондовых биржах.

Возьмите смесь лимонной и серной кислоты, бромат калия и соль железа и взболтайте. Если концентрация смеси правильная, вы получите раствор голубого цвета. Продолжайте помешивать — смесь внезапно становится красной. Продолжайте взбалтывать, и она снова становится голубой, и так далее — регулярное и наглядное чередование красного и голубого. Это знаменитая реакция Белоусова-Жаботинского, которая ведет себя как хаотичная динамическая система. Фактически это и есть динамическая система, подчиняющаяся уравнениям эволюции, не очень отличающимся от уравнений, исследованных Лоренцем, и снова открывшая «странный магнит» (один красный лепесток и один голубой!). При несколько отличающихся условиях, вместо регулярного чередования во времени, красно-голубые колебания становятся нерегулярными; и все же другие концентрации реагентов вызывают эффект чередования в пространстве, организуясь в полосы или спиральные волновые узоры красного и голубого цвета (цветная иллюстрация 13). Илья Пригожин утверждал, что эта способность выведенных из равновесия динамических систем самоорганизовываться в структуры в пространстве и времени носит общий характер и может объяснить некоторые отклонения от нормы, наблюдаемые в природе и даже в живых организмах. Спиральный рисунок электрических волн, поддерживающих биение вашего сердца, подчиняется уравнениям, подобным уравнениям реакции Белоусова-Жаботинского.

Для более приятного примера возьмите чашку кофе и взболтайте. Делая это, вы поставляете поток энергии на том уровне, который доступен вашей чашке. Но так как вязкость кофе забирает энергию, которую вы приложили, кофе течет с уменьшающимися витками, которые в конце концов ослабевают до крошечных, почти невидимых завитушек[2]. Вы произвели турбулентность — еще одну ипостась хаоса. В полностью развитой турбулентности присутствует высокая степень *самоподобия,* поэтому увеличенное изображение турбулентного потока показывает отчетливый рисунок его витков и завихрений и будет продолжать делать это при изменении степени увеличения на много порядков. Это свойство самоподобия, когда система в увеличенном виде имеет ту же форму, что и в оригинале, характерна для фракталов, а фракталы и их геометрия сыграли немалую роль в исследовании хаоса. Слово «фрактал» придумал Бенуа Мандельбро для описания таких кривых, как линия берега или контур облака, которые демонстрируют самоподобие в широком диапазоне — в идеализированном, математическом, масштабе, а также в иных масштабах. Очень известной и наглядной иллюстрацией фрактальной кривой является контур фигур Мандельбро, которые часто можно

видеть на психоделических плакатах (цветная иллюстрация 14). «Странный магнит» является фракталом — ни линия, ни поверхность, но что-то среднее. За этими замечательными изображениями кроется нечто большее, чем простое «математическое» любопытство. Этот новый вид геометрии продолжает неожиданно появляться во многих отраслях науки, а не только в турбулентных потоках ветра и погоды. Физики до сих пор еще не привыкли к необходимости справляться с этим видом математической сложности. Но я не сомневаюсь, что она никуда не исчезнет, и на пороге двадцать первого века нам опять придется принять этот вызов.

Еще один нерешенный вопрос: что произойдет с хаотичной динамикой, если классическую, по существу, эволюцию Ньютона, лежащую в основании всех уравнений, и движение, которое я описал в этой главе, заменить на квантовую эволюцию, по сравнению с которой динамика Ньютона выглядит лишь приблизительной? Траектории в фазовом пространстве должны будут уступить место чему-то еще — чему-то более неопределенному и менее детерминистическому. Изучение этого взаимодействия между квантовой неопределенностью и классическим хаосом по-прежнему является актуальным.

ГЛАВА 6

ВАШЕ МЕСТО ИЛИ МОЕ

Теория относительности и теория поля

Для Ньютона время и ход времени являются универсальными: «Абсолютное, истинное и математическое время, само по себе и по своей природе течет ровно, безотносительно ко всему внешнему, а другое его название — это длительность: относительное, явное и общее время является некой разумной и внешней (точной или неустойчивой) мерой длительности, осуществляемой посредством движения, которая обычно используется вместо истинного времени; такой мерой является час, день, месяц, год» (Principif Mathematica, издано Р.Т. Крофорд [Беркли: Университет Калифорния Пресс, 1939], С.6). Ход времени может быть измерен астрономической мимолетностью, равномерным тиканьем часов или колебанием кварцевого кристалла. Если мы сверяем наши часы, кто бы смог сомневаться, что мы будем и дальше договариваться о времени, в которое будут происходить будущие события?

Но это не так: следствием теории относительности является то, что от постулата Ньютона об абсолютном времени следует отказаться. Время следует измерять относительно наблюдателя, а наблюдатели в разных состояниях движения могут измерять разные временные интервалы между одними и теми же двумя событиями, даже если они используют идентично настроенные, точные часы. Действительно, необходимо перепроверить само понятие *одновременности.*

Эйнштейн начал эту повторную проверку в 1905 году в своем научном докладе, в котором он впервые представил свою специальную теорию относительности: «Когда я говорю, например: "Поезд прибывает в 7", это значит, что переход маленькой стрелки на моих часах в точку, отмеченную цифрой 7, и прибытие поезда являются одновременными событиями». (Леопольд Инфельд, работавший с Эйнштейном в 1930-х годах, называл это «самым простым предложением, которое я когда-либо встречал в научных трудах».) С этим мы можем согласиться, но это не означает, что длительность путешествия из Вены в Берлин — такой, как ее понимают начальники станций, и такой, как ее понимает пассажир в поезде, будет одинаковой. Для пассажира время отъезда и приезда определяется измерениями в поезде; но для начальников станции время отъезда было измерено в Вене, а время приезда — в Берлине. Логический ход мысли Эйнштейна привел его к поразительному

заключению: движущиеся часы отстают! В результате — длительность путешествия, измеренная пассажиром, будет меньше, чем измеренная начальниками станций. Чтобы понять, почему так происходит, представьте себе часы, сделанные из двух зеркал, одно из которых находится на полу вагона поезда, в котором едет пассажир, другое — на потолке вагона. Во время путешествия импульс света отражается в виде колебаний из стороны в сторону между этими зеркалами. Счет числа отражений будет способом измерением времени путешествия. Но помните, что скорость света равна «*c*» и что она не зависит от движения зеркал; это следствие электродинамики Максвелла, и эксперименты подтверждают его в полной мере. Итак, чтобы вычислить время путешествия, нам нужно взять только величину общего расстояния, пройденного светом при его отражениях туда и сюда между зеркалами, и разделить ее на скорость движения, то есть «*c*».

Для пассажира в поезде это расстояние равно числу отражений, определяющих расстояние между зеркалами (высоту вагона). Но для начальников станций свет не движется прямо вверх и вниз, потому что зеркало на потолке передвинется ближе к Берлину, так как свет был отражен от зеркала на полу, и поэтому между каждым отражением расстояние будет *больше*, чем просто высота вагона. Следовательно, начальники станций придут к заключению, что путешествие было длиннее, чем время, измеренное пассажиром. Они могли бы подумать, что часы в поезде отстают.

Это «растяжение времени» было предсказано Эйнштейном в его специальной теории относительности; но это не только вопрос теории. Самым точным хронометром, который мы можем построить в настоящее время, являются «атомные часы», в которых колебания кварцевого кристалла (как в наручных часах) заменены на вибрации атомов цезия; их точность выше, чем одна часть от 10^{13}. Двое цезиевых часов, сразу после синхронизации, будут показывать одно и то же время с точностью одна секунда за миллион лет. И все же если одни часы полетят в скоростном самолете вокруг Земли, они покажут более короткую продолжительность полета, чем часы, оставшиеся на Земле. Это *предсказание* специальной теории относительности — но больше, чем предсказание, так как был осуществлен эксперимент, который доказал его истину. Влияние специальной теории относительности является незначительным для скоростей, с которыми мы сталкиваемся в нашей повседневной жизни. Но для скоростей, приближающихся к скорости света, эффект становится значительным — настолько, что, например, у мю-мезона (радиоактивной частицы, являющейся составной частью космических лучей), пересекающего атмосферу со скоростью 99,9% от скорости света (что и неудивительно), период существования окажется в двадцать раз длиннее, чем у мю-мезона в состоянии покоя.

Соответственно, расстояние, пройденное мю-мезоном, — то есть толщина атмосферы — будет равно 30 км, измеренным наблюдателем на Земле; но с точки зрения наблюдателя, движущегося с этой частицей, оно будет не более 1 км. Это сжатие было описано Хендриком Лоренцем и Джорджем Фитцджеральдом. Расстояние между двумя событиями и их разделение во

времени зависит от движения наблюдателя. Если я полечу на Луну, для меня запуск и посадка произойдут в одном и том же месте — а именно там, где я нахожусь, в космическом корабле; в то время как для ЦУПа эти два действия будут разделены расстоянием в 250 000 миль. В этом нет ничего загадочного, или даже эйнштейновского — возможно, это просто странный способ отражения вещей[1]. Длительность полета измеряется центром управления полетом; я могу послать им сигнал о времени моего прибытия, и они сделают поправку на время, которое было затрачено на то, чтобы мой сигнал дошел до них. Я могу на часах зафиксировать время полета на борту моего корабля. Как было сказано, я определю длительность, отличающуюся от длительности, зафиксированной ЦУПом. Итак, мы имеем два события — запуск и приземление, которые, согласно разным наблюдателям, разделены по-разному, как в пространстве, так и во времени. Однако, согласно специальной теории относительности Эйнштейна, есть нечто, с чем единодушно согласятся все наблюдатели, и это — разделение в *пространстве-времени,* что вычисляется очень просто, на основании показателей разделения в пространстве и времени, с помощью формулы, напоминающей теорему Пифагора[2].

Специальная теория относительности Эйнштейна заменила относительность классической механики, которая возвращается назад, к Галилео. Галилео считал, что только относительное движение имеет физическое значение[3]. В пространстве нет меток, по которым мы могли бы определить абсолютное движение, а только другие тела, относительно которых становится заметным наше движение. Как говорил об этом Ньютон:

«Но так как невозможно увидеть части пространства или отличить одну от другой с помощью наших ощущений, вместо них мы используем разумное их измерение. Потому что по положению и расстоянию от любого тела, принимаемого за неподвижное, мы определяем все другие объекты; и затем относительно таких мест мы оцениваем все движения, рассматривая тела как передвигаемые из одного такого места в другие. И следовательно, вместо абсолютных мест и движений мы используем относительные; и делаем это, не создавая никаких неудобств для обычных дел; но во время философских изысканий нам следует абстрагироваться от наших чувств и рассматривать вещи сами по себе, отдельно от того, что является чувственным их измерением. Так как может оказаться, что тела, находящегося в состоянии покоя, с которым можно было бы соотнести места и движения других тел, в состоянии покоя не существует».

Более того, Эйнштейн признал, что время тоже не имеет «водоразделов». С учетом отсутствия величин абсолютного пространства или абсолютного времени в качестве водоразделов в понятии пространстве-времени можно использовать только *события,* а разделение между событиями в пространстве и времени зависит от положения наблюдателя.

Галилео хорошо понял, что на свойства физических систем не влияет равномерное движение (движение без ускорения по прямой линии). Разные наблюдатели одних и тех же явлений могут, конечно, сообщать о разных значениях того, что они измеряют. Некто, идущий по коридору поезда, может

иметь скорость 105 км/ч относительно наблюдателя, стоящего на мосту над железнодорожными путями, но всего 5 км/ч относительно наблюдателя, покупающего выпивку в буфете вагона. Конечно, есть способ установить связь между двумя наблюдениями: поезд идет со скоростью 100 км/ч (100 + 5 = 105). Пока сохраняется последовательность в использовании наблюдений наблюдателя на мосту или наблюдателя в буфете поезда, физические свойства наблюдаемого объекта соотносятся с одними и теми же законами движения. Это принцип теории относительности. Законы движения Ньютона соответствуют этому принципу, используемому наряду с простым дополнительным законом о скоростях, проиллюстрированным ранее. Но Эйнштейн увидел противоречие между этим и тем фактами, которое скрыто в уравнениях Максвелла, а именно, что скорость света, в отличие от скорости движения пассажира по коридору поезда, является одной и той же и для наблюдателя на мосту, и для наблюдателя в буфете вагона, движущегося относительно моста со скоростью 100 км/ч. Он видел, что единственным способом примирить прогнозы Максвелла с принципом теории относительности было изменение правил, которые позволяют наблюдателям связывать их наблюдения одно с другим. От простого дополнительного закона скоростей необходимо было отказаться. А вместе с ним — и от механики Ньютона, которая, однако, «выжила», оставаясь замечательным ориентиром для описанных явлений, который подразумевает лишь движение со скоростью, намного меньшей, чем скорость света.

С точки зрения пассажира поезда чашка кофе, которую он купил в вагоне-ресторане, стоит перед ним на столике неподвижно; для наблюдателя на мосту она движется со скоростью 100 км/ч. Для одного количество ее движения и кинетической энергии равно нулю; для другого — оба эти показателя не являются нулевыми. Существуют простые правила для установления связи между тем, что видит пассажир, и тем, что видит наблюдатель на мосту, и такие же правила для соотнесения всех видимых кинематических объектов, измеренных двумя наблюдателями. Эти правила являются центром специальной теории относительности. Они не являются правилами физики Ньютона. *Специальным пунктом* в специальной теории относительности является то, что она описывает способ, с помощью которого разные наблюдатели, движущиеся относительно друг друга особым образом, могут соотнести свои измерения интервалов между событиями в пространстве или во времени, а также все кинематические величины (ассоциируемые с движением, таким как скорость, энергия и количество движения), имеющие отношение к области механики. *Специальными* являются движения не ускоряемых наблюдателей относительно друг друга, как в теории относительности Галилея. Гипотетический корабль Галилео (см. примечание 3) не мог бы взлетать на волнах и качаться! В общей теории относительности Эйнштейн ослабил ограничения на равномерное относительное движение наблюдателей, и результатом стала дальнейшая трансформация нашего понимания пространства и времени, даже за пределами их слияния в пространство-время, осуществленного в специальной теории относительности. Пространство-время больше не

является пассивной ареной, на которой происходят события в области физики. Геометрия пространства-времени сама является динамически активным участником драмы.

Изменения в кинематике, внесенные специальной теорией относительности, влекут за собой изменение механики Ньютона. Это изменение было навязано Эйнштейну, после того как он согласился принять следствия электродинамики Максвелла, а именно, что скорость света в вакууме на самом деле является универсальной константой, независимой от движения источника или детектора света. Этот факт, абсолютно подтвержденный экспериментами — как теми, которые были блестяще проведены Майклсоном и Морли в 1887 году, так и многими учеными после них — несовместим с правилами трансформации теории относительности Галилея[4]. Необходимо было чем-то пожертвовать; у Эйнштейна хватило мужества предложить, чтобы это была теория относительности Галилея и законы инкорпорирующей ее механики Ньютона, но не электродинамика Максвелла. И все же, несмотря на ее очевидную оригинальность и все те серьезные последствия, которые она влечет за собой, специальная теория относительности пока может рассматриваться только как часть классической физики; она принадлежит физике «долгого девятнадцатого века».

Но синтез специальной теории относительности и квантовой механики — релятивистская квантовая теория поля — определенно принадлежит физике двадцатого века; и я не сомневаюсь, что объединение общей теории относительности и квантовой теории поля будет завершен в двадцать первом веке (более подробно об этом в последующей главе). Переговоры об этом слиянии были необычайно тяжелыми и потребовали некоторых уступок с обеих сторон. Казалось, что потребуется объединить все физические явления в единую теорию, включая объединение гравитации с электромагнетизмом, от чего предостерегал Вольфганг Паули, полагая, что люди не должны соединять вместе то, что Господь разорвал на части[5].

Чтобы примирить квантовую механику со специальной теорией относительности, требуется больше, чем просто релятивистское уравнение, которое обобщает выкладки Шредингера. В 1928 году Дирак создал релятивистское уравнение для электрона, которое имело удивительные последствия. Оно правильно описывает спин электрона и, что он ведет себя подобно крошечному гироскопу или подобно крошечному магниту. Но еще более удивительно то, что уравнение Дирака предсказало существование *аныти-электрона* или *позитрона*, который вскоре был обнаружен экспериментальным путем. Фактически позитроны оставляли свои следы на фотографиях диффузионной камеры еще до появления работы Дирака, но в них не увидели то, чем они были на самом деле. Только формулирование релятивистской квантовой теории поля открыло путь к новым горизонтам в фундаментальной физике. Потому что для релятивистских квантовых полей частицы больше не являются неизменными, постоянными объектами; их можно создавать и разрушать (как мы уже видели, это происходит с фотонами). Частицы можно воспринимать как кванты разных полей, и взаимодействие этих полей позволяет нам

понять, как, например, нейтрон исчезает, полностью уничтожается, и в это же самое время создается протон и электрон и антинейтрино. А именно это и происходит, когда ядро кобальта-60 превращается в ядро никеля, выпуская электрон, который, как надеется рентгенолог, разрушит раковую клетку. Экспериментальные открытия субатомной и субядерной физики во второй половине двадцатого века были все переплетены с релятивистской квантовой теорией поля. Было открыто удивительное свойство разнообразия частиц, так как в экспериментах использовались все более и более высокие энергии. Физика частиц — это физика высокой энергии, потому что для создания и изучения частиц, время существования которых перед распадом может быть всего лишь миг, требуется энергия, и чем массивнее частица, тем больше требуется энергии[6]. Как показал Эйнштейн в одном из своих четырех великих научных трудов в 1905 году, $E=mc^2$, что означает, что энергия и масса являются взаимозаменяемыми при фиксированной скорости обмена, обусловленной квадратом скорости света[7].

Теория, которая описывает, как электромагнитное поле взаимодействует с электронами и позитронами, является наглядным примером релятивистской квантовой теории поля. Эта квантовая электродинамика, КЭД, является на удивление результативной, но прежде чем можно было в полной мере использовать ее возможности по прогнозированию, потребовался значительный скачок вперед в ее развитии. Большая часть предсказаний этой теории имеют форму четких, последовательных и все более и более совершенных шагов ради приближения к точному результату, что соответствует особой методике, называемой теорией возмущения[8]. То, что теория была большей частью верна, подтверждал высокий уровень соответствия между экспериментом и предсказанием на первом уровне приближения; но то, что теория была глубоко ошибочной, стало ясно, когда на следующем уровне приближения появилась бесконечная поправка! Сначала были найдены пути для обхода этой проблемы с помощью явно специфических методов, чтобы «вычесть» «бесконечный» термин, оставив небольшую «конечную» часть. Эта математическая уловка действительно повысила уровень согласия теории с результатами экспериментов[9], но было ясно, что это средство является неудовлетворительным и требует точных доказательств.

В результате последовали новые попытки совершенствования нашего понимания «частицы». Например, электрон взаимодействует с электромагнитным полем благодаря своему заряду и тем самым создает в нем помехи. Эти помехи в поле можно рассматривать в виде колеблющегося облака фотонов (квантов электромагнитного поля), окружающего электрон. «Голый» электрон «одет» фотонами — не фотонами, свободными для распространения, а «фактическими» фотонами, излучаемыми, а потом захватываемыми электроном с мимолетным присутствием, в соответствии с принципом неопределенности Гайзенберга. Энергия, ассоциируемая с этим облаком, является *беспредельной*, и поэтому к массе электрона ее добавляется бесконечное количество. Но, разумеется, наблюдаемая масса электрона имеет предел; следует допустить, что *голая* масса электрона также является беспредельной, но

такой, чтобы отменить вклад фотонного облака и оставить только конечный остаток, который мы наблюдаем как массу физического, «одетого» электрона. Эта отмена бесконечно больших величин теории возмущений была последовательно произведена Ричардом Фейнманом, Джулианом Швингером и Сянитиро Томонага. Она основана на устранении беспредельной разницы между «голой» и «одетой» массой наряду с таким же подходом к заряду. Процедура называется *перенормировкой*, и теория перенормировки была одним из великих достижений теоретической физики середины двадцатого века. В более поздних уточнениях было показано, как в таких теориях, как КЭД, которые могут быть перенормированы (то есть бесконечно большие величины теории возмущений могут быть устранены последовательным образом), можно переставить составляющие при расширении возмущений, чтобы осталась только конечная, физическая, «одетая», масса и заряд, а бесконечно большие величины были устранены навсегда.

Не все взаимодействующие теории поля способны к перенормировке. Кажется чудом, что только те теории, которые проходят строгую проверку на способность к перенормировке, нужны для описания всего, что наблюдается в физике частиц, и во многом способность к перенормировке в решающей степени зависит от того факта, что взаимодействия имеют особый вид симметрии, называемой *калибровочной симметрией*. Однако есть одно заметное исключение: гравитационное взаимодействие не способно к перенормировке! Как это часто случается, для большинства целей физики высоких энергий эта проблема не имеет особого значения, потому что силы тяготения, хотя и преобладают на макроскопическом уровне, на уровне физики частиц являются совершенно ничтожными. (Например, сила тяготения между электроном и фотоном почти в 10^{40} слабее, чем электростатическая сила.)[10, 11] Однако требование создать стройную теорию тяготения невозможно игнорировать, и с наступлением двадцать первого века она стала основным фокусом, в котором сосредоточены усилия многих физиков-теоретиков. Самым волнующим в этом стремлении является то, что цель может быть действительно достигнута. Я вернусь к этой теме в главе 10 при обсуждении *теории суперструн*.

А пока позвольте мне акцентировать внимание на том, что синтез специальной теории относительности с квантовой механикой стал причиной радикального сдвига в понятии того, что подразумевает радикальная частица. Это больше не материальная, неструктурированная масса, неизменная и несокрушимая. Вместо этого — квантовое возбуждение поля, и хотя оно дискретное и локализуемое, несущее материальные свойства массы, энергию и количество движения, оно наследует волновые признаки поля. Элементарные частицы были заменены возбуждением поля, поэтому естественно задать вопрос: чем тогда являются элементарные поля? Поскольку невозможно исследовать частицу, не принимая во внимание ее взаимодействие со всеми другими видами частицы/поля, ответ тут в некотором смысле — дело вкуса. Например, то, что мы называем протоном, является иногда в определенных отношениях нейтроном и пи-мезоном; а то, что мы называем пи-мезоном, на самом деле иногда протон и антинейтрон[12]. Если большие блохи держат

на спине маленьких блох, чтобы их кусать, так и протоны содержат протоны, и так до бесконечности. Можно даже говорить о «поле атома водорода», но будет гораздо полезнее думать об атоме водорода как о связанном состоянии протона и электрона или — если кто-то настаивает на использовании картины теории поля — как о смешанном возбуждении полей электрона и протона. Но даже протон является соединением, у которого есть, как показывают тщательные исследования, структура. А на фундаментальном уровне лучше всего считать его связанным состоянием еще более элементарных частиц, называемых кварками. Следование этой линии аргументации привело к признанной «стандартной модели» физики высоких энергий. Согласно этой теории элементарными частицами материи являются кварки и лептоны (частицы, подобные электрону и нейтрино). Но более подробно об этом поговорим в главе 8.

ГЛАВА 7

МНОГО ИСТОРИЙ, МНОГО ВАРИАНТОВ БУДУЩЕГО

Метод Файнмана для создания квантовой механики

В книге «Характер физического закона»[1], изданной в 1965 году, Ричард Файнман писал: «Я уверенно могу сказать, что никто не понимает значения квантовой механики». Несмотря на то что исследования основ квантовой механики продолжаются все так же энергично, а в последние годы они стали более интенсивными благодаря замечательным экспериментам, ставшим возможными благодаря прогрессу в области оптики и возможности захватывать отдельные атомы и манипулировать ими, утверждение Файнмана остается актуальным. Но как сказал Мюррей Гелл-Ман: «Квантовая механика — [это] такая загадочная, приводящая в замешательство дисциплина, которую никто из нас не понимает, но которую мы знаем, как использовать. Она отлично работает, насколько мы можем судить, при описании физической реальности»[2]. Чтобы сформулировать квантовую механику, можно использовать разные способы. В первом из них, благодаря Гайзенбергу, использовались ряды цифр, которые математики называют матрицами. За ним вскоре последовала волновая механика Шредингера (см. главу 4). Через несколько месяцев было доказано, что эти две теории, на вид очень разные, являются эквивалентными. Вся эта работа, и более того, была выполнена в 1925–26 годах. К 1930 году лежащая в основе математическая структура, поддерживающая как матричную, так и волновую теории, была представлена в учебнике Дирака[3]. В более поздних изданиях этой книги есть малопонятный отрывок, сопровождаемый следующим предупреждением: «Этот раздел могут пропустить те студенты, которые не особенно знакомы с высшей динамикой».

Один из способов, в котором квантовая механика действительно нашла применение, использует подход, разработанный Файнманом и описанный им уже в 1942 году в его докторской диссертации. Основанием всего этого служат идеи, изложенные в непонятном отрывке из книги Дирака. Подход Файнмана дает результаты, аналогичные результатам матричной механики Гайзенберга или волновой механики Шредингера — что неудивительно, поскольку в своей основе они одинаковые. Но этот подход успешен при условии применения квантовой механики к теории поля. И невозможно себе представить, как бы без этого развивалась теория струн.

Классическая механика интересуется эволюцией динамических систем во времени. Мгновенное состояние системы может быть представлено точкой в

фазовом пространстве, а уравнения движения затем определяют, как движется эта точка, то есть как система развивается от исходного до конечного состояния. Квантовая механика также интересуется развитием динамических систем от одного состояния до другого. Но описание состояний и описание уравнений движения являются радикально, концептуально разными.

Предположим, я хочу послать ракету на Луну. Одним из способов использования классической механики Ньютона для определения траектории полета ракеты является решение уравнений движения с помощью исходных данных (о положении запуска и скорости запуска), отбираемых таким образом, чтобы удачно приземлиться. В другом варианте я могу отправиться в полет, чтобы определить его «историю» от запуска до посадки, то есть траекторию, которая начинается от пусковой площадки в некое назначенное время и заканчивается на посадочной площадке на Луне в заданное время. Для осуществления этого способ найден. Для любой воображаемой траектории, любой истории, даже не согласующейся с законами движения, можно определить параметр, называемый *действием*, которое зависит от положения и времени запуска и положения и времени посадки, а также от пути следования, соединяющего их (и от сил, воздействующих на ракету). Удивительным и серьезным следствием законов движения Ньютона является то, что *действительной* траекторией полета ракеты, совместимой с законами движения, является траектория, при которой действие находится в экстремуме (минимальном или максимальном). Этот принцип действия, впервые предложенный Мопертюи и позднее уточненный Гамильтоном, является сутью «высшей динамики», на которую ссылался Дирак. И он участвует в подходе Файнмана к квантовой механике весьма своеобразно.

Перед тем как продолжить, позвольте мне сделать отступление, чтобы указать на еше один серьезный принцип — на этот раз из области классической геометрической оптики. Пьер де Ферма установил, что все законы рефракции и отражения света можно свести к утверждению, что время, затрачиваемое светом на то, чтобы пройти путь от источника до изображения по действительному световому лучу, является минимальным, то есть меньше, чем затраты времени на любой воображаемый путь, отличающийся от самого луча[4]. Классическая геометрическая оптика является приближением к волновой оптике без ее характерных явлений дифракции и интерференции. Когда длина волны света может быть настолько маленькой, что ею можно пренебречь, геометрическая оптика может рассматриваться как достаточное приближение. Многих до Файнмана должна была поражать аналогия между принципом Ферма, который определяет пути световых лучей как ограничительную форму волновой оптики, и принципом наименьшего действия, который определяет траекторию частицы в классической динамике. В оптике интенсивность света может быть вычислена из квадрата амплитуды (по существу, силы колеблющегося электромагнитного поля — вспомните, что свет, — это нечто иное, как вид электромагнитной волны). Эта амплитуда сама является суммой величин разных источников, или многих путей, которые могут усилить или аннулировать один другой, вызывая явления дифрак-

ции и интерференции, характерные для волн. В квантовой механике также есть *амплитуда*. Ее также можно вычислить, суммируя доли участия, которые, сталкиваясь, усиливают друг друга, когда согласуются между собой, или отменяют друг друга при отсутствии согласия. В предписаниях Файнмана для вычисления амплитуд квантовой механики в полной мере используется аналогия с волновой оптикой. Но в квантовой механике с помощью метода возведения амплитуды в квадрат вычисляется *вероятность* квантового перехода.

Файнман убеждает нас рассматривать все мыслимые движения, которые могут переносить исходное состояние в исходный момент времени до последующего состояния в последующее время — так же, как это делается при использовании принципа Гамильтона. Потому что каждое такое движение, каждая такая возможная история определяет *классическое* движение. Разделите это на h, постоянную Планка, и установите тождество результата с углом. Квантовая амплитуда может быть затем получена суммированием результатов участия всех этих историй способом, аналогичным использованию принципа Ферма (рис. 7.1).

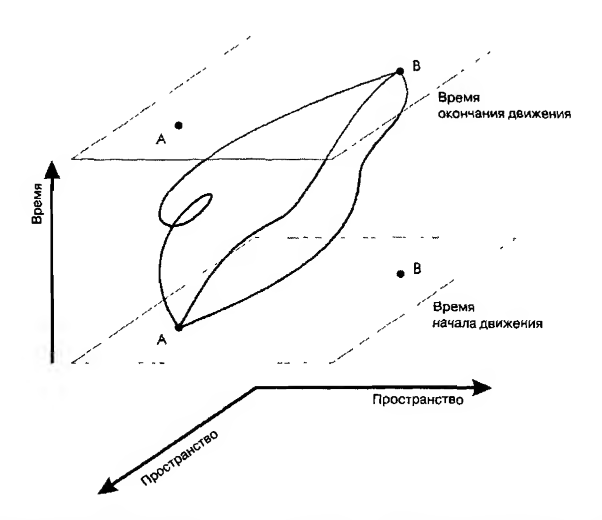


Рис. 7.1. Различные «истории» для частицы, переходящей из А в В

Теперь волна имеет как размер, так и фазу, угол, который определяет периоды ее подъема и спада. Все истории, говорит нам Файнман, должны быть соотнесены с одним и тем же размером; но фаза каждой — это просто вычисленный нами угол. Поэтому, говорит Файнман, произведите оценку всех историй для определения квантовой амплитуды, возведите ее в квадрат для определения вероятности, и вот вам результат! Как удивительно и как странно! В некотором смысле эволюция сопровождает *все* мыслимые истории, а не только одну уникальную, отобранную в классической механике. И как в волновой оптике, волны достигают своего места назначения, следуя всеми возможными путями (при этом уникальный луч принципа Ферма все же выделяется в коротковолновой границе), уникальная классическая траектория может быть выведена

из формулировки Файнмана с помощью «классического предела», в котором постоянная Планка принимается за ничтожно малую величину.

Характерным для квантового мира является понятие *интерференции*, связываемой со всеми волновыми явлениями. Пересекающиеся волны на поверхности водоема могут усиливать друг друга, если их фазы совпадают — то есть когда они поднимаются и опускаются вместе, или ослаблять друг друга, когда одна волна идет вверх, а другая вниз. То же самое верно для квантово-механических амплитуд, вычисляемых по правилам Файнмана или по уравнению Шредингера. В этом отношении квантовые волны подобны волнам на поверхности водоема или волнам в классическом описании света. И как водяные волны, они могут демонстрировать *когерентность* (то есть оставаться в состоянии согласия) длительное время или на больших расстояниях. Одно время были популярны два пианиста — Равич и Ландауер, которые прославились своей способностью играть в унисон. Они начинали играть пьесу вместе, сидя в соседних комнатах; затем дверь между ними закрывалась почти до конца этой пьесы, а когда дверь открывали, оказывалось, что их игра неизменно совпадает по времени. Так же длинная колонна гвардейцев идет нога в ногу от первого ряда до последнего, демонстрируя пространственную когерентность. Интерференция — в классической оптике, в волнах на поверхности водоема или в квантовых явлениях — проявляет себя только в присутствии достаточного уровня когерентности.

Особенно интенсивное использование «суммирующего» подхода Файнмана мы наблюдаем в квантовой электродинамике (КЭД) и в других теориях поля, которые встречаются в физике частиц высокой энергии. Он также полезен в физике твердых тел, в которой, например, *фононы*, кванты звуковых волн, имеют описание, очень похожее на описание фотонов, квантов света. Мы уже видели, что сотрудничество между квантовой механикой и теорией относительности привело к признанию, что частицы — электроны, протоны и т.д., а также фотоны — могут возникать и разрушаться, и квантовая теория поля — это лучший способ описать, каким образом это происходит. Можно считать, что квантовые поля действуют, чтобы создавать или уничтожать свои кванты. Когда Файнман применил свои правила к квантовой теории поля, он смог непосредственно представить, каким образом благодаря их взаимодействию поля несут «ответственность» за такие явления, какие случаются при рассеивании частиц, или в более сложных процессах, исследуемых в ускорителях частиц. При столкновении двух частиц могут возникнуть разные конечные состояния. Для каждого из них можно вычислить степень вероятности и сравнить с результатами экспериментальных измерений. Амплитуда для каждого такого перехода — от исходного состояния двух столкнувшихся частиц до любого из возможных конечных состояний — может быть рассчитана в соответствии с предписаниями по «суммированию историй», и полученный результат даст представление об амплитуде на языке так называемых *диаграмм Файнмана* (рис. 7.2).

Например, если в исходном состоянии присутствуют электрон и протон, а в конечном состоянии — протон, позитрон и два электрона (а это возможно!),



Рис. 7.2. Ричард Файнман у доски. (© Видеоархивы Эмилио Сегре, Американский институт физики.)

один комплект историй будет иметь исходный электрон, взаимодействующий с электромагнитным полем так, чтобы создать фотон, который затем поглощается протоном, который, в свою очередь, распространяется некоторое время, прежде чем генерировать еще один фотон, который затем превращается в пару «электрон-позитрон». Все это может быть резюмировано в виде простой диаграммы (рис. 7.3), на которой показаны последовательные точки, в которых происходят взаимодействия, создающие или разрушающие частицы, распространяющиеся в интервалах между взаимодействиями. Каждой из этих диаграмм будет затем соответствовать совокупное участие в общей амплитуде этого процесса, которая может быть вычислена в соответствии с некоторыми очень простыми правилами. Итак, процедура является или по меньшей мере кажется очень простой. Сначала нарисуйте все возможные диаграммы Файнмана, отражающие степень участия в процессе. Затем следуйте предписаниям для оценки участия каждой из них в общей амплитуде. И наконец, сложите их вместе и возведите в квадрат, чтобы установить вероятность процесса (фактически его скорость).

Ну что ж, это не так-то просто! Во-первых, в процессе участвует бесконечное количество диаграмм, а суммировать бесконечные ряды составляющих всегда было сложной задачей. Что касается КЭД, то случается, что диаграммы, описывающие более сложное участие в процессе, содержат все более высокие энергии постоянной (фактически квадрат заряда электрона), которая определяет силу электромагнитных взаимодействий. Эта постоянная

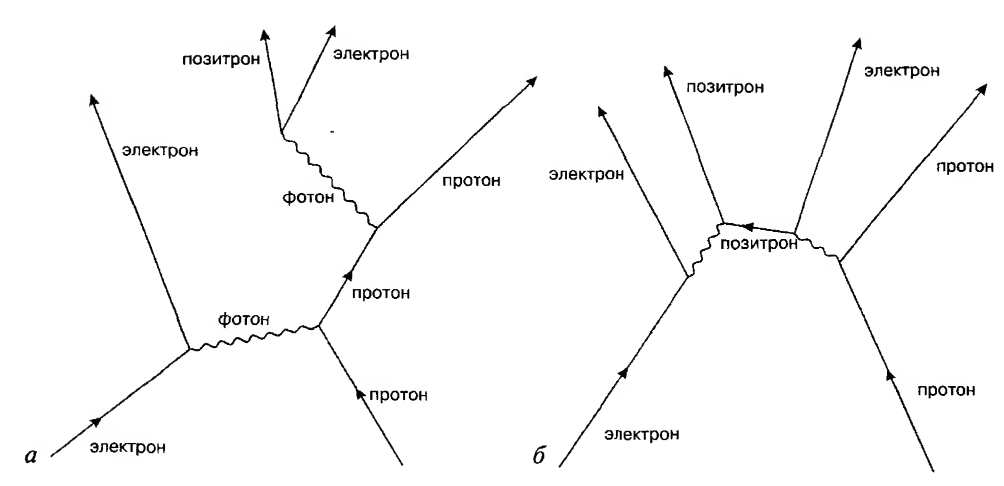


Рис. 7.3. *а* — Диаграмма Файнмана о степени участия в процессе, в котором электрон и протон становятся протоном, позитроном и двумя электронами; *б* — Другая диаграмма Файнмана о степени участия в том же самом процессе

является знаменитой «константой тонкой структуры», введенной Арнольдом Соммерфельдом во время его очень ранней попытки ввести релятивистские поправки в модель атома Бора. В числовом выражении она близка к $(1/137)^5$, — достаточно малая величина, чтобы можно было утверждать, что нам нужно вычислять только самые простые диаграммы, скажем, те, которые несут энергию до одной пятой или шестой от этой небольшой величины. В конце концов, $(1/137)^5$ равна приблизительно 2×10^{-11}, что действительно является очень маленькой величиной, но тщательность выполнения экспериментов требует именно такой точности для сравнения с теорией. Этот подход, основанный на последовательно увеличивающейся энергии постоянной тонкой структуры, называется *теорией возмущений;* это напоминает способ, который можно использовать в классической механике для вычисления возмущающего влияния движения одной планеты на другие. Как было сказано в предыдущей главе, есть еще проблемы, которые необходимо решить, — это бесконечности, которые были настоящим мучением на ранних этапах вычислений. Но процедуры перенормировки Файнмана, Швингера и Томонагава объединились и защитили более ранние методы вычитания, установив общие правила для укрощения этих бесконечностей в КЭД. Этот подход является действенным также для ограниченного класса теорий, называемых калибровочными теориями. По счастливой случайности те из них, которые необходимы для микрокосмоса, о котором пойдет речь в следующей главе, являются именно калибровочными теориями. Сформулированный принцип, по меньшей мере для КЭД, в которой коэффициент связи (постоянная тонкой структуры) очень мал, производит большое впечатление благодаря своим практическим успехам. Эксперименты отличаются точностью, и теория согласуется с ними необычайно точно — с погрешностью менее одной стомиллионной.

Последующие теоретические уточнения переделали программу перенормировки так, чтобы можно было получать формулировку, в которой бесконечности отсутствуют с самого начала. В настоящее время у нас есть класс релятивистских квантовых теорий поля со способностью к перенормировке, которые дают конечные результаты при каждом порядке приближения. И как было сказано ранее, пертурбационная КЭД работает на удивление хорошо, и в то же время эта теория, несомненно, имеет изъяны, потому что она содержит в себе семена своего собственного разрушения! Можно доказать, что расширение возмущения не является конвергентным. По всей вероятности, это то, что математики называют асимптотическим расширением, означающим, что принятие во внимание условий последовательного увеличения порядка дает сначала последовательное улучшение приближений, но после какого-то момента это приближение начинает колебаться, и результаты расходятся. К счастью для КЭД, приближение, по всей видимости, не будет ухудшаться до тех пор, пока не будут включены первые 137 или около того степеней коэффициента тонкой структуры. А величина $(1/137)^{137}$ действительно является ничтожно малой.

Как бы то ни было, в квантовой теории поля есть такие особенности, которые являются предметом изучения в наше время, и, без сомнения, эти исследования продолжатся в следующем, двадцать первом веке. Сюда входят *солитоны*, которые имеют свойства материальных частиц, — например, энергию и количество движения — но рассеяны в пространстве; их немного грубовато называют «комьями» энергии и количества движения. Солитоны имеют старую историю в классической теории волн, но только с приходом электронных компьютеров появилась возможность лучше оценить их свойства. Они играют важную роль в понимании устойчивых структур, которые могут возникать в хаотических системах. И они также играют заметную роль в расширении теории суперструн, известной как М-теория. Более подробно мы поговорим об этом в главе 10.

Один из математических «трюков», используемых при вычислении амплитуд Файнмана, предполагает, что временная переменная имеет чисто воображаемую величину[6]. Эта идея принадлежит Герману Миньковскому, который преподавал математику Эйнштейну и идеи которого об унификации пространства и времени оказали большое влияние на теорию относительности Эйнштейна, как общую, так и специальную[7]. Когда переменная времени превращается в воображаемую величину, фазовое выражение суммируемых историй становится тем, что математики называют затухающей показательной функцией, а сама сумма становится адекватно определяемым математическим выражением. Фактически она точно соответствует суммам, которые встречаются в *статистической механике*. Там имеют дело с расчетом корреляций между физическими величинами в раздельных точках в среде, находящейся в термическом равновесии. Квантовым флуктуациям, которые могут быть вычислены по методу Файнмана, соответствуют термические флуктуации в статистическо-механическом аналоге.

Основанная в девятнадцатом веке Болтцманом и Джозиа Гиббсом, статистическая механика показывает, как макроскопические понятия, такие как

давление, температура и энтропия, могут быть связаны с поведением мириадов атомов и молекул, составляющих макроскопическое количество материи (в стакане воды содержится около 10^{25} молекул). Гиббс, в частности, вывел законы термодинамики из статическо-механической базы. Болтцман был заинтригован тем, что хотя законы физики Ньютона не различают «стрелу времени» (так что если бы мы могли мгновенно изменить в обратную сторону направление скоростей всех частиц в системе Ньютона, организованное таким образом движение просто повторило бы предыдущую историю, как прокручиваемая назад пленка), макроскопические системы все же демонстрируют четкое различие между будущим и прошлым характером поведения. Лед в стакане теплого лимонада тает; трение приводит качающийся маятник в состояние покоя. Осуществленное Болтцманом согласование микроскопической временной симметрии уравнений движения с наблюдаемым приближением макроскопических систем к состоянию равновесия способствовало введению идеи вероятности в классическую физику. Предоставленная самой себе, система всегда будет стремиться к состояниям увеличивающейся вероятности и будет двигаться к менее вероятным состояниям только временами. Он связал эту идею с новым пониманием термодинамической величины, называемой энтропией, которую теперь связывают с вероятностью состояния[8]. Эти новые идеи подверглись острой критике, особенно в свете теоремы Пуанкаре, которая показывает, что система, предоставленная самой себе, в конце концов вернется произвольно — хотя, может быть, и через очень большой промежуток времени — в состояние, близкое к исходному. «Время возврата Пуанкаре» является чрезвычайно длительным; для любой реалистичной системы оно превышает возраст Вселенной. В ответ на возражение, что «возврат» Пуанкаре подрывает его согласование макроскопической временной асимметрии с микроскопической временной симметрией, Болтцман, как говорят, ответил: «Вы должны прожить этот срок» (рис. 7.4).

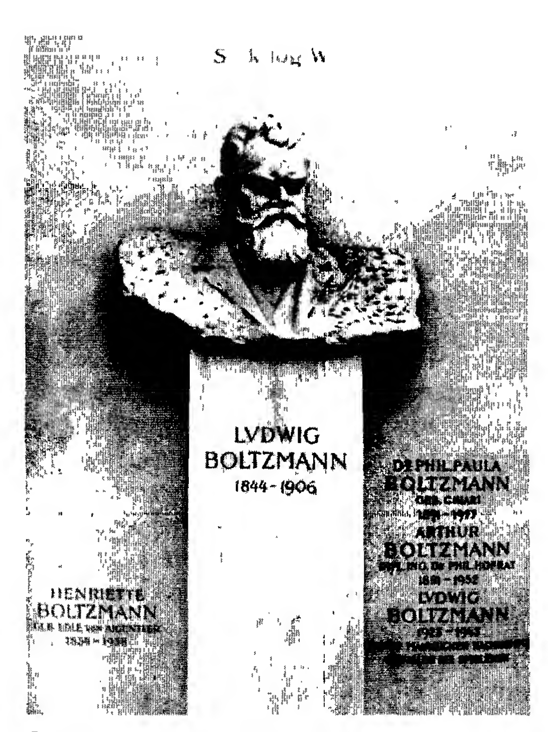


Рис. 7.4. Надгробие Болтцмана на Центральном кладбище в Вене. (С любезного разрешения Австрийской центральной физической библиотеки.)

Статистическая механика предоставляет гораздо больше возможностей, чем простое выведение законов термодинамики. В частности, она позволяет исследовать термические отклонения от точки равновесия, которые играют большую роль в таких явлениях, как плавление или кипение, ко-

торые называются фазовыми переходами. Соответствующее поведение макроскопической системы определяется поведением ее отдельных атомных составляющих с помощью процедуры усреднения, в которой суммируются конфигурации системы, которые, хотя и различаются на микроскопическом уровне, на макроскопическом уровне являются аналогичными. (Например, если бы все молекулы воздуха в комнате, где я пишу это, произвольно изменили направление, образовалась бы новая конфигурация, на микроскопическом уровне отличающаяся от предыдущей, но не имеющая какой-либо серьезного значения для макроскопического уровня, и я бы точно ничего не заметил.) Существует очень глубокое сходство между суммой конфигураций Гиббса-Болтцмана и суммой историй Файнмана. Если амплитуда, рассматриваемая в квантовой теории, отражает вероятность того, что состояние системы будет неизменным, через некий ограниченный промежуток времени T (так что конечное состояние является точно таким же, как исходное состояние — неважно, что могло произойти в промежуточное время), полученное выражение, при использовании абсолютно воображаемой переменной времени, точно соответствует тому, что получают при статистическо-механическом вычислении для системы при конечной температуре, обратно пропорциональной времени T. И это скрыто за удивительными термодинамическими свойствами черных дыр в общей теории относительности (см. главу 10).

Математические аналогии следует принимать с известной долей скептицизма, прежде чем допускать их вмешательство в физику. Но эта аналогия между термическими флуктуациями в классической статистической механике и квантовыми флуктуациями в формализме Файнмана действительно заслуживает внимания, и не только с точки зрения термодинамики черных дыр. Она ведет к очень глубокому проникновению в сущность теории струн, где мы имеет дело с результатами, математически эквивалентными статистической механике некоторых систем в так называемых *критических точках*. В критической точке флуктуации (термические или квантовые) имеют такой же вид самоподобия, с которым мы встречались в явлении турбулентности: увеличенный вариант системы в критической точке выглядит очень похожим на оригинал. Например, в стороне от критической точки вода, кипящая при 100 °C, имеет плотность, отличающуюся от плотности водяного пара при той же самой температуре; между ними проходит резкая граница. Но в критической точке это различие становится расплывчатым; внутри каждой капли жидкости имеются пузырьки пара, а внутри каждого пузырька капля жидкости — независимо от масштаба, характерного для фрактальной геометрии. В современном подходе к перенормировке используется нечто подобное. Предполагается, что исследуемая теория поля подвержена последовательным изменениям масштаба. Логически вытекающее изменение в получаемых амплитудах вычисляется затем в терминах «коэффициентов эффективной связи», которые определяют интенсивность взаимодействия между полями; эти коэффициенты необходимо подстраивать на каждом уровне изменения для поддержания соответствия. В некоторых случаях, важных как в статистической физике, так и в теории поля и струн, для эффективных коэффициентов находят фиксированные точки, и именно они определяют общие физические свойства.

В классической детерминистической системе вся история определяется, лишь исходя из условий, существующих в какой-либо момент времени. Статистическая механика признает, что для макроскопических систем, требующих использования огромного числа переменных величин для получения полного описания состояния, бесполезно, да это и не нужно, пытаться тщательно отслеживать искомое движение. Достаточно сделать менее точное описание, чтобы достигнуть одной цели — определить *среднее* поведение всей совокупности систем, которые так похожи друг на друга, что их можно описывать приблизительно одними теми же словами. Так, например, чтобы узнать, как из пробитой шины выходит воздух, глупо пытаться отследить движение каждой молекулы этого воздуха. Достаточно будет статистических методов. Но сейчас мне хотелось бы обратиться к еще одному аспекту понятия историй в эволюции динамической системы.

Подход Файнмана к квантовой механике создает вероятность развиться от исходного состояния в любое возможное конечное состояние с помощью суммы всех возможных историй, которые могли бы описать такое развитие. И результат получается таким же, какой следует из уравнения Шредингера. Однако остается неразрешимым вопрос: что именно определяет, *какой* из возможных вариантов действительно реализуется? Что определяет, произошел или нет распад атома во время часового пребывания кошки в ящике? Как квантовая механика объясняет «коллапс волновой функции», квантовый переход, который превращает наложение возможных результатов только в один? Каким-то образом сам процесс измерения заставляет систему находить решение, и это както связано с взаимодействием между наблюдаемой системой и наблюдающим устройством. Ключ к разгадке лежит в признании, что измеряющее устройство является макроскопическим. Несмотря на то что он все еще подчиняется законам квантовой механики, его состояние содержит столько степеней свободы, что, как в статистической механике, не очень четкое описание становится не только полезным, но в практическом смысле обязательным. Чтобы ответить на вопрос, жива кошка или мертва, необходимо взять средний показатель всех возможных состояний, согласующийся с тем или иным результатом. И при этом усреднении теряется когерентность, которую бы обеспечило подробное микроскопическое описание, а вместе с ней парадоксальное наложение живой/мертвой кошки. Уравнение Шредингера описывает то, как квантовая система развивается, когда она остается в спокойном состоянии. Неизбежное столкновение с окружающей средой, непрерывные всплески теплового возбуждения, которые испытывает любой макроскопический объект, следует учитывать, если мы хотим рассматривать систему атом-плюс-кошка как квантовую систему, а это не имеет смысла. Поэтому нам следует признать, что незначительные параметры состояния кошки не являются ни доступными, ни интересными, и поэтому произведем их усреднение. Результат должен разрушить наложение живой и мертвой кошки. Остается только корреляция между состоянием атома (распался/не распался) и состоянием кошки (мертвая/живая).

Эта потеря связи происходит не сразу: для этого требуется небольшой, но ограничивающий промежуток времени, который можно определить. Для кош-

ки потеря связи (декогерентность) происходит так быстро, что это невозможно измерить; но существуют мезоскопические системы, достаточно большие, чтобы показать такой вид декогерентности, и все же достаточно небольшие, чтобы сделать время декогерентности измеряемым. Остроумные эксперименты — например в лаборатории Кастлера Бросселя в Париже — показали, что это именно то, что случается на самом деле, и следовательно, можно сказать, что мы видели, как классическая картина мира возникает из лежащей в его основе квантовой реальности. В этих экспериментах двойником кошки Шредингера является электромагнитное поле в крошечной микроволновой полости — кремниевой сфере, имеющей в поперечнике всего одну десятую миллиметра. «Кошку» подготавливают, пропуская через полость атом, который находится в состоянии когерентного квантового наложения между двумя разными состояниями — аналогами распавшегося/нераспавшегося атома Шредингера. И так же, как кошка вводится в состояние наложения между живой и мертвой, так и поле вводится в квантовое состояние, которое является наложением двух различных состояний. Чтобы увидеть, жива кошка или мертва, мы можем открыть ящик, но в Парижском эксперименте используется «мышка», чтобы узнать, жива «кошка» или нет; то есть состояние поля проверяется пропусканием еще одного атома через полость. Результаты полностью подтверждают ожидаемую декогерентность окружения. В настоящее время большинство физиков признает, что именно быстрая декогерентность квантового состояния любой сложной системы, плохо изолированной от окружения, объясняет парадокс Шредингера и в конечном счете позволяет нам понять, каким образом классические свойства без какой-либо видимости квантового вмешательства выявляются из основ квантовой механики.

Это можно сравнить с тем, как каждое измерение квантовой системы заставляет ее выбирать один из ее собственных возможных результатов. Если мы откроем ящик и кошка окажется живой, мы будем знать, что атом не распался; если кошка мертвая — атом распался. Но пока мы не посмотрим, мы не узнаем результата. Некоторые физики будут утверждать, что до момента нашей проверки система все еще остается в связанном наложении двух возможных состояний (кошка как жива, так и мертва). Более правдоподобное суждение заключается в том, что бесконечное взаимодействие с окружением уже разрушило связь, и даже до того, как мы заглянем в ящик, оно сделало два возможных состояния не связанными один с другим и, следовательно, неспособными демонстрировать дальнейшую интерференцию (кошка определенно является живой или мертвой). Как будто каждое взаимодействие с окружением оказывало такое же влияние, какое оказывает измеряющее устройство: оно заставило квантовое состояние «делать выбор». Развивая дальше эту мысль, одно из толкований квантовой механики (одно из самых странных), утверждает, что каждое взаимодействие действительно является таким и что после взаимодействия все возможные результаты остаются и все еще способны интерферировать друг с другом. Но в *нашем* мире только те состояния будут доступны нашему будущему наблюдению, которые согласуются со сделанными нами наблюдениями, хотя всегда можно найти подходящий вариант. Это «многомировое» толкование квантовой механики имеет своих последователей[9], но мне трудно согласиться с этими постулатами. Возможно, я оцениваю его не так высоко, как оно того заслуживает!

ГЛАВА 8

МИКРОКОСМОС

Стандартная модель физики частиц

В 1939 году физика частиц почти не отличалась от родственной дисциплины — ядерной физики. Во второй половине двадцатого века была известна лишь горсточка частиц, привлекавшая внимание физиков. Для исследования ядер и субъядерных частиц и их взаимодействий требуются очень большие энергии. Это опять является следствием принципа неопределенностей: для изучения мелких деталей требуется исследование небольших длин волны, которое подразумевает большое количество движения, а следовательно, высокую энергию. Для очень высоких энергий в качестве источника использовалось (и продолжает использоваться) естественное космическое излучение. Но космическое излучение становиться все более рассеянным, чем выше поднимается уровень энергии, поэтому уже в 1930-х годов были разработаны и построены искусственные ускорители. При очень высоких уровнях энергии, бывших когда-либо предметом исследования (самая высокая зарегистрированная энергия космического луча была равна $3{,}2 \times 10^{20}$ электрон-вольт — кинетическая энергия теннисного мяча при скорости 100 миль/ч, сконцентрированная в одной субатомной частице!), космические лучи рассеяны так, что детекторы, установленные на участке 6000 кв. км, смогут предположительно обнаружить всего несколько тысяч частиц в год с энергией выше 10^{19} электрон-вольт. Но такая детекторная решетка уже строится[1].

Циклотроны, скромные по сравнению с инженерными шедеврами нашего времени, были созданы Эрнестом Лоренсем и находились в авангарде нового поколения «разрушителей атома». Самый большой из них был реквизирован во время Второй мировой войны для отделения расщепляющихся частиц урана (U^{235}), использованных для создания бомбы, разрушившей Хиросиму. Физики вместе со своими машинами были направлены на выполнение новых задач. После войны они достигли потрясающих результатов, и не только с помощью научных открытий, служивших военной машине. Роберт Оппенгеймер, возглавивиший Манхэттенский проект по разработке атомной бомбы, был глубоко обеспокоен тем, что он делал; другие ученые решительно устранились от участия в проекте. (Я знаю только одного участника Манхеттенского проекта, который действительно вышел из него, и это был Джозеф Ротблат, который в 1995 году получил Нобелевскую премию мира.) Физики также приобрели мастерство и навыки, необходимые для сотрудничества в гигантских проектах, разрабатывая и конструируя новые технические устройства, в которых использовали результаты последних от-

крытий, направляя их на решение актуальнейших проблем науки. Успехи, достигнутые в научных исследованиях, сделали их уверенными и смелыми в использовании результатов своей деятельности. Научные разработки переместились из лабораторий на заводы Оук Ридж и Лос Аламос, от группы в несколько человек — к скоординированным действиям многочисленных коллективов. Появилось новое, важное научное направление. Одним из примеров использования наследия большой науки является международный проект ATLAS, в котором будет применяться Большой адронный ускоритель (или LHC) в CERN, Европейской лаборатории по физике частиц (рис. 8.1); 1800 ученых из 150 институтов в 33 странах уже принимают участие в этом проекте. Его детектор начнет снимать данные в 2005 году (рис. 8.2, цветная иллюстрация 15).



Рис. 8.1. Лаборатория CERN – вид сверху. Круги на фотографии показывают, в каких местах под землёй работает комплекс ускорителей и накопительных колец. (Фото Cern, © CERN, Женева.)

Безжалостная, необратимая сила большой науки, как некоторые ее воспринимают, хотя и была выпущена на волю в связи с требованиями военного времени, продолжает существовать и развиваться в мирное время. Построены огромные лаборатории, и не только для физики высоких энергий. Например, лаборатория CERN, которая разместилась близ Женевы, на границе между Францией и Швейцарией, в любой момент может принять до 2000 ученых, и не только из 20 стран-участниц, но также из более чем десятка других стран.

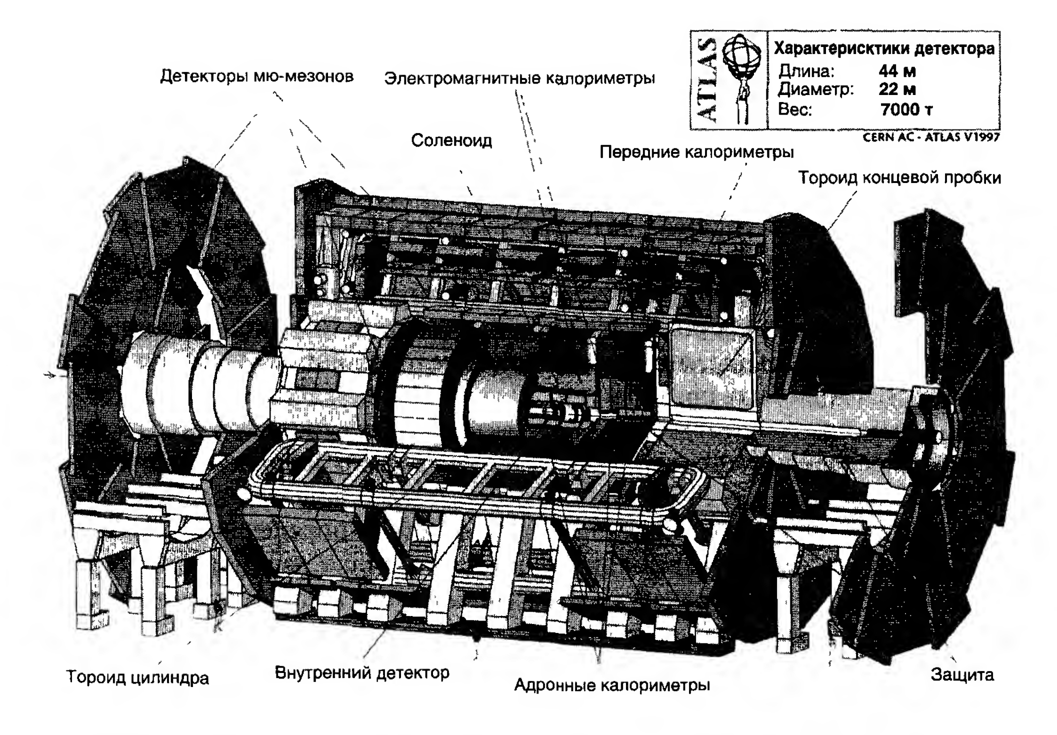


Рис. 8.2. Схема в разрезе детектора ATLAS. (Фото CERN, © CERN Женева.)

Одной из великих наград за работу в этой области является осознание себя участником действительно международного проекта: в CERN запрещены какие-либо флаги или другие национальные знаки. Возможно, что все будущие лаборатории такого масштаба обязательно будут международными, и не только по составу персонала, но и в отношении финансирования. Соединенные Штаты потеряли около 2 млрд долларов и 6 лет, затраченные на планирование и строительство, когда отказались от своего проекта по строительству Сверхпроводимого суперускорителя в Уоксахачи (Waxahachie), штат Техас, оставив после себя бесхозный участок туннеля длиной 14,5 мили, в котором должна была разместиться установка, и лишив работы сотни высококвалифицированных ученых и инженеров. Сейчас США являются участником проекта LHC в CERN.

Открытия физики частиц за прошедшие полвека привели нас к модели структуры материи (комплект элементарных частиц и сил, кроющихся за ними), которая имеет диапазон, способный охватить все явления физики частиц и, следовательно, явления ядерной и атомной физики, а также вплоть до химии и других областей. (Конечно, это не означает, что больше нечего добавить при переходе с одного уровня на другой на пути от физики частиц к химии — схема пути показана на рис. 1.2. Однако законы химических реакций являются, по меньшей мере в принципе, следствием свойств элементарных частиц, а не наоборот.) У нас есть *стандартная модель* для исследования

основ физики частиц. Стандартная, потому что она признана большинством физиков в этой отрасли правильной по своей сути. Но только модель — потому что, хотя она обеспечивает надежную, прочно связанную конструкцию для объяснения и описания всех наблюдаемых явлений, остаются важные «незакрепленные концы». Некоторые, в принципе рассчитываемые, прогнозы пока что не соответствуют нашим техническим возможностям. И слишком много произвольных параметров нужно «вводить вручную», чтобы теоретики смогли чувствовать себя спокойно в рамках стандартной модели как истинно фундаментальной теории. (Можно было бы поразмышлять над отчаянным оптимизмом, который угадывается в этом неудобстве. Век назад большинство физиков согласились бы, что многие показатели, вводимые ими при описании мира, должны быть приняты просто как данность. Их можно было измерить, причем довольно точно; но неразумно было предполагать, что их можно было определить, используя всего лишь несколько основных постоянных величин. Теперь же, на заре двадцать первого века, большая часть физиков согласилась бы считать принципиально возможным определение всех основ физики, исходя именно из такого небольшого числа параметров. Причем приблизительно двадцать шесть параметров, необходимых для определения стандартной модели, вообще считается слишком большим числом!)

Помните, что, когда я говорю о частицах, я также говорю и о полях: частицы являются основными квантовыми возбудителями полей, которые названы *их именами*. Мы можем различать два разных варианта поля. Один, примером которого является электронное поле, имеет в качестве своих квантов частицы, которые подчиняются принципу исключения Паули; никакие две частицы не могут иметь одно и то же квантово-механическое состояние. Электроны и другие подобные им частицы быстро крутятся как крошечные гироскопы, при этом величина кинетического момента равна одной второй, выраженной в естественных единицах квантовой механики[2]. Такие частицы называются фермионами по имени Энрико Ферми, который вместе с Дираком первым описал их статистику; совокупности фермионов удовлетворяют другой вид статистической механики, отличный от различаемых частиц классической механики. Еще один вид частиц, к которому принадлежит и протон, несет кинетический посыл спина в одну единицу (спин протона связан с поляризацией света). Другие же частицы имеют нулевой спин. Частицы с нулевым или целым спином называются *бозонами* по имени Сатьяндра Боза, который вместе с Эйнштейном описал их тип статистической механики.

Поведение совокупностей фермионов лежит в основе структуры атомов и молекул, теории металлов и электронных устройств, стабильности звезд. Поведение совокупностей бозонов подкрепляет теорию лазеров — и успех Планка в объяснении спектра черных дыр. Но в действительности физика не может подразделяться на изолированные поддисциплины, так как исследование одной темы может помочь понять многие другие.

А сейчас позвольте мне вернуться к рассказу о стандартной модели. Она содержит фермионы, которые могут описывать материю; она содержит бозо-

ны, которые можно рассматривать как медиаторы сил. (См. таблицу в конце этой главы.) Например, в квантовой электродинамике электрические и магнитные силы между движущимися зарядами можно объяснить благодаря их обмену фотонами. Материальные поля можно объединить в три группы, называемые *генерациями*, которые во многих отношениях являются «сделанными под копирку оттисками» друг друга и отличаются только по массе. (Эксперименты с высокими энергиями установили, что существует не более трех генераций — гипотеза также потребовала выполнить астрофизические наблюдения, согласующиеся с наблюдениями другой стандартной модели современной физики — большим взрывом.) В каждой генерации имеется частица, подобная электрону, несущая одну (отрицательную) единицу электрического заряда; в этих трех генерациях — последовательно — содержится сам электрон, мю-мезон и тау. Так как все они электрически заряжены, они все взаимодействуют с электромагнитным полем. С каждой из этих частиц связан разный вид нейтрино, один для каждой генерации. Мю-мезон имеет массу почти в 207 раз больше, чем у электрона, а тау — в 17 раз. Эти коэффициенты массы входят в число параметров стандартной модели, которые необходимо «вводить вручную». До 1998 года не существовало прямого доказательства, что нейтрино имеют вообще какую-либо массу. (Пусть вас не беспокоит понятие частицы с нулевой массой! Так называемая масса частицы — это сокращение от *массы покоя,* связываемой (уравнением $E = mc^2$) с энергией, которую она несет даже в состоянии покоя. Частицы с нулевой массой покоя могут никогда не находиться в состоянии покоя; они всегда движутся со скоростью света. Неудивительно, что фотон как раз и является такой частицей.) Тем не менее, у физиков есть много косвенных причин верить, вернее, надеяться, что нейтрино действительно имеют массу, и в настоящее время появляется все больше свидетельств, подтверждающих этот факт. Нейтрино являются электрически нейтральными и не взаимодействуют с электромагнитным полем. Но как у всех материальных частиц, у них есть так называемые *слабые взаимодействия*; правда, других у них нет, кроме силы тяжести. Слабые взаимодействия являются такими ничтожными, что нейтрино, генерированные во время термоядерных реакций, питающих солнце энергией, свободно проходят сквозь землю, не имея почти никакого шанса вступить во взаимодействие. И все же редкие случаи взаимодействия солнечных нейтрино удалось обнаружить и исследовать, а также генерировать при более высоких энергиях и развернуть нейтринные лучи. Впервые нейтрино были обнаружены непосредственно в ядерном реакторе в 1956 году Фредериком Райнсом и Клайдом Коуеном. Райнс описал поиск нейтрино как попытку «услышать шепот москита во время урагана», но, как было написано в газете «Лос-Анджелес Таймс» в некрологе по случаю его смерти: «Он услышал и изменил представление о Вселенной».

Эксперимент Супер-Камиоканде, который показал, что по меньшей мере один из нейтрино имеет массу, иллюстрирует тонкости физики частиц. Хотя нейтрино взаимодействуют чрезвычайно слабо, они в большом количестве генерируются космическими лучами, входящими в атмосферу:

каждую секунду сквозь нас проходят около 100 таких рожденных космическими лучами нейтрино. Но шанс, что один из них вступит во взаимодействие — так, как это бывает, — равен всего лишь одному из десяти за всю нашу жизнь! Чтобы исследовать такие редкие взаимодействия, требуется массивный детектор, в данном случае контейнер, содержащий 50 000 тонн сверхчистой воды в цинковой шахте на глубине 600 метров под горой Икена в Японии. Гора наверху служит барьером для большей части космической радиации, но не препятствует прохождению нейтрино. На самом деле трудность эксперимента состоит в том, чтобы сравнить скорость обнаружения нейтрино, произведенных в атмосфере наверху, со скоростью нейтрино, проходящих через детектор и генерированных на другой стороне земли и затем прошедших сквозь нее. Не забудьте, что 100 нейтрино проходит сквозь вас каждую секунду, следовательно около 30 млн/сек проходит через огромный детектор (рис. 8.3). Время от времени, пять или шесть раз в день, один

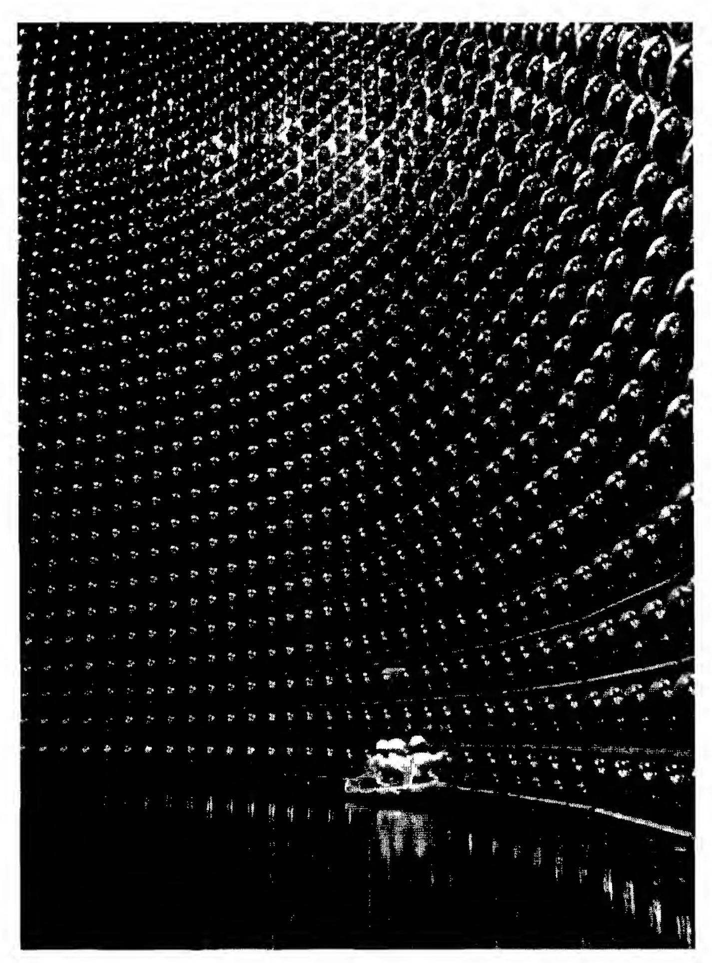
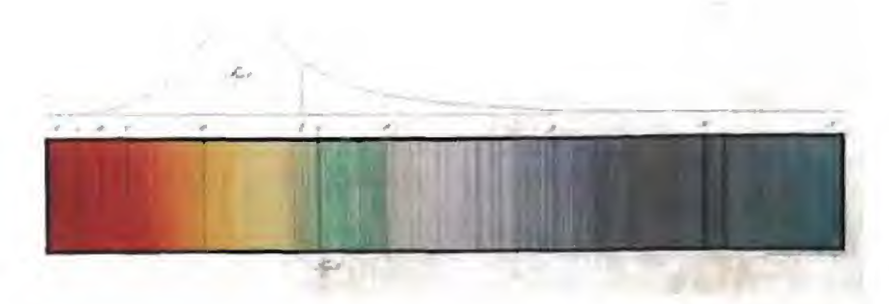


Рис. 8.3. Детектор Камиоканде показан здесь наполовину заполненным водой во время строительства. (Институт по исследованию космических излучений, Токийский университет.)



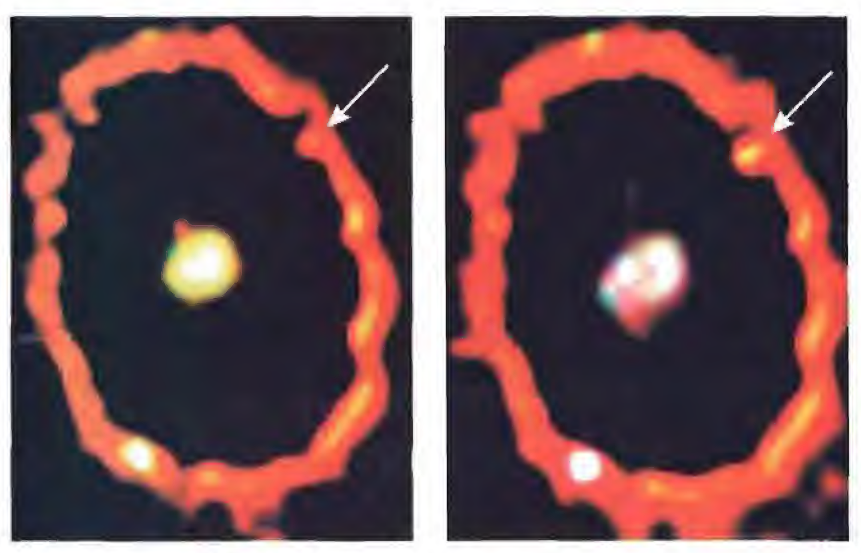
Илл. 1. Темные линии в спектре солнечного света, как их видел Фраунгофер (С благодарностью к Fraunhofer Gesellschaft, Munich)



Илл. 2. Млечный путь в изображении спутника COBE (Cosmic Background Explorer). Фотография И.Л. Райта (UCLA). Проект COBE, DIRBE, NASA



Илл. 3. Туманность Андромеды, очень похожа на нашу галактику, также является членом нашего галактического кластера. (© Jason Ware)

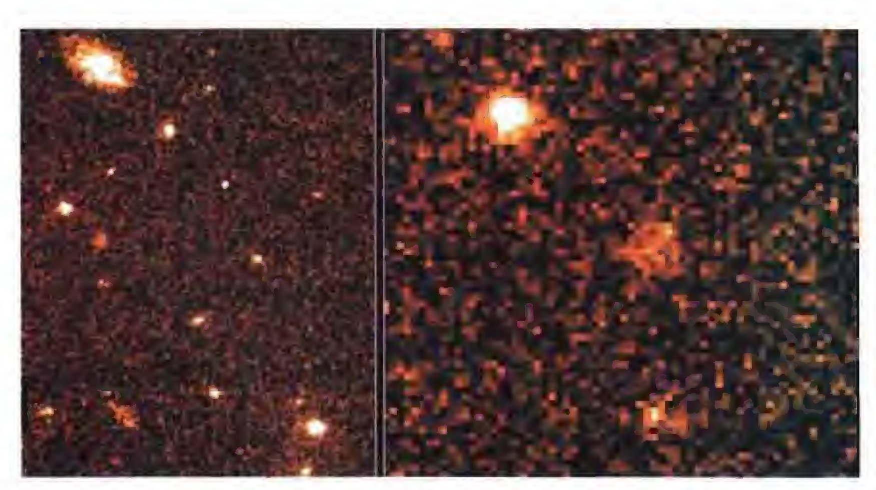


Илл. 4. Сверхновая SN1987A. Наблюдения телескопа Хаббл показывают наполняющийся ярким светом узел вверху на правой стороне кольца, окружающего остаток сверхновы. Это место мощного столкновения между движущейся наружу взрывной волной и самыми крайними с внутренней стороны фракциями околозвездного кольца. Столкновение нагревает газ и заставляет его светиться. (Фотография П. Гарнавича из Гарвард-Смитсоновского астрофизического центра и НАСА)



Илл. 5. Участок неба, который можно закрыть булавочной головкой, если ее держать на расстоянии вытянутой руки. При увеличении, как на этой иллюстрации, на данном участке открывается плотная область далеких галактик, каждая из которых содержит десятки миллиардов звезд. Фотография сделана космическим телескопом Хаббл во время десятидневного наблюдения над южным полушарием. (Фотография Р. Уильямса (STScI), HDF-S team, NASA)

Илл. 6. Кластер галактик Coma: тысячи галактик, и каждая состоит из миллиарда звезд. (Фотография О. Лопес-Круза и И.К. Шелтона (U. Toronto), Kitt Peak National Observatory)



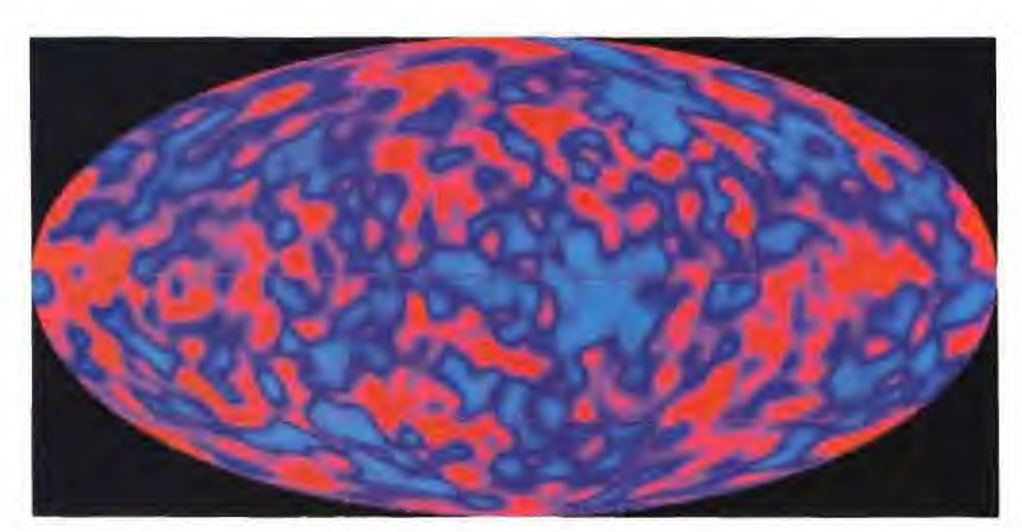
Илл. 7. Галактика-хозяйка излучателя гамма-лучей. Космический телескоп Хаббл сделал эту фотографию через четыре месяца после того, как этот излучатель был замечен в первый раз. (Фотография К. Саху, М. Ливио, Л. Петро, Д. Маккетто. STScI and NASA)



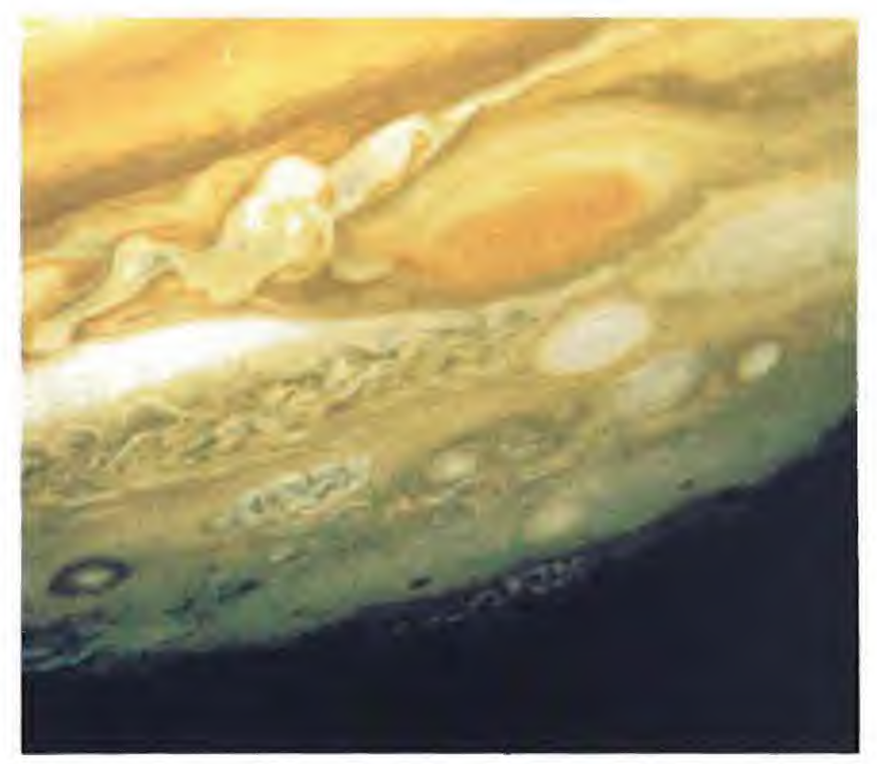
Илл. 8. Туманность Орла. Внутри этих огромных облаков водородного газа формируются звезды по мере уплотнения газа под действием силы тяготения. (Фотография Джеффа Хестера и Пола Сковена, Arizona State University, and NASA)



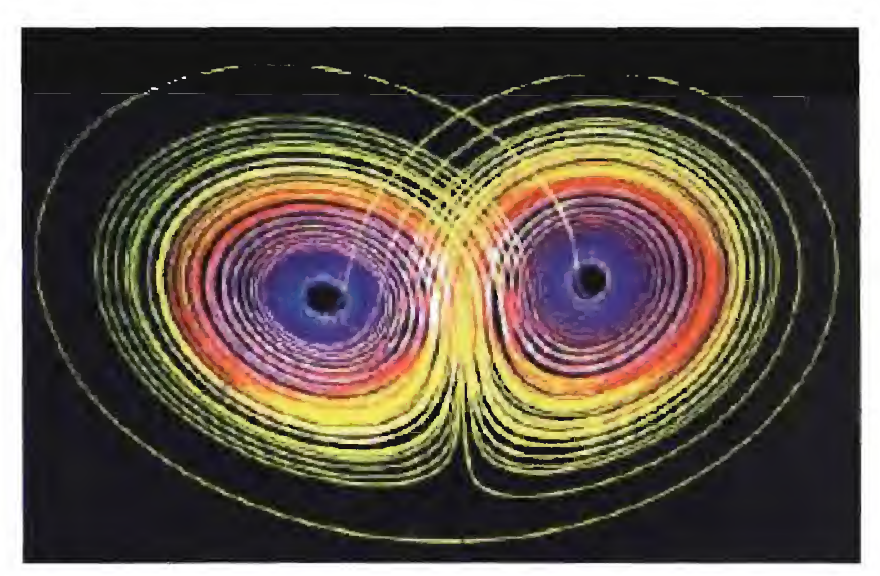
Илл. 9. Туманность Рака, остаток сверхновы, которую наблюдали в 1054 г., представляет собой газ, распространяющийся вокруг пульсара. (Фотография FORS Team, 8,2-meter VLT, ESO)



Илл. 10. Температурные изменения в космическом микроволновом фоне по всему небу. Они представлены на этом изображении разным цветом и отражают структуру реликтовой вселенной. (Из баз данных COBE, разработанных Годдаровским центром космических полётов НАСА под руководством Научной рабочей группы COBE и предоставленных NSSDC)



Илл. 11. Юпитер, опоясанный грядами облаков, и Большое Красное Пятно – антициклон, который сохраняется вот уже сотню лет. (Фотография сделана аппаратом Войяджер 1; JPL, NASA and NSSDC)

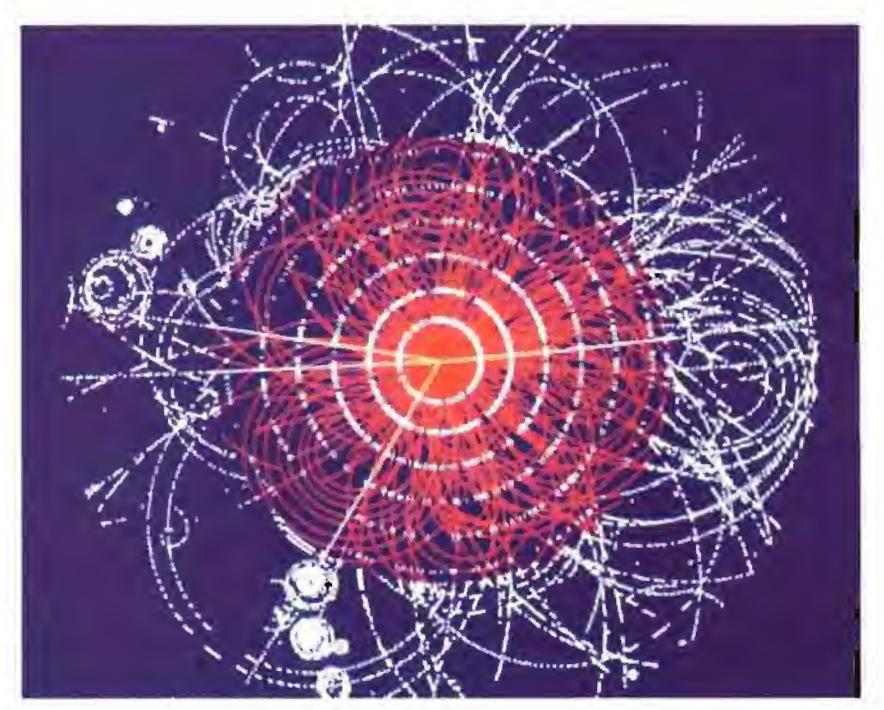


Илл. 12. Траектория хаотичной системы, наматывающая круги вокруг странного «магнита» Лоренца



Илл. 13. Спиральные рисунки, спонтанно генерированные во время реакции Белоусова-Жаботинского. (Фотографии профессора Руоффа, Staveger University College, Норвегия)

Илл. 14. Компьютерные изображения из комплекта Мандельброта. При увеличении мелких деталей на кромке видно, что они очень похожи на большое изображение, частью которого являются



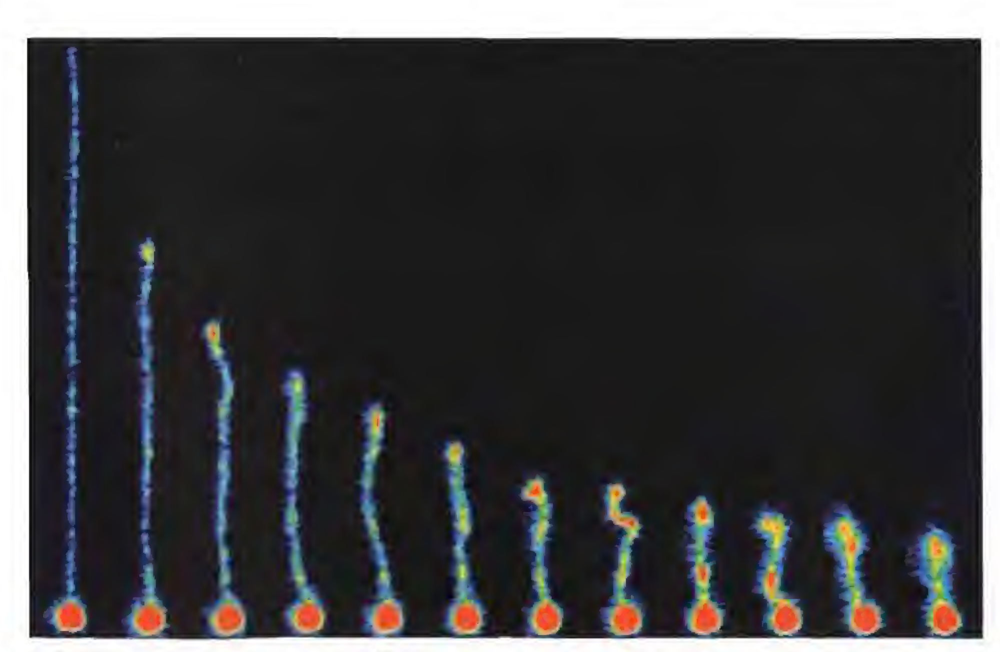
Илл. 15. Имитация события, для записи которого был спроектирован детектор ATLAS. (Фотографии CERN. © CERN Geneva)



Илл. 16. Пара верхних кварков, как их изобразил D0-эксперимент в Национальной лаборатории Ферми близ Чикаго. Этот вид с торца показывает конечные продукты распада: два мюона (черепаховая окраска), нейтрино (алый цвет), и четыре струи частиц (С любезного разрешения Национальной лаборатории Ферми)



Илл. 17. Спиралевидный диск пыли питает массивную черную дыру в галактике NGC 4261. (Фотография Х.Форда и Д. Феррарезе (JHU), NASA)



Илл. 18. Единственная молекула ДНК, прикрепленная к 1-микронной сфере, растянута на полную длину в 39 микрон, а затем освобождена от натяжения. Последовательные кадры на фотографии разделены интервалом 4,5 сек. (Фотография Т. Перкинса, С. Куэйка, Д. Смита и С. Чу. Выбрана с разрешения Т. Перкинса и др., Science 264, 823 (1994). © 1994 American Association for the Advancement of Science)

из них сталкивается с ядром кислорода в воде и производит либо электрон, либо мю-мезон. Эти заряженные частицы, с энергией, достаточной, чтобы путешествовать со скоростью, близкой к «*c*», скорости света в вакууме, на самом деле движутся быстрее, чем скорость света в воде, которая равна 3/4 «*c*». Здесь нет конфликта с теорией относительности, которая запрещает частице двигаться быстрее «*c*» — скорости света в вакууме. Как снаряд, который превышает скорость звука и производит ударную волну, звуковой удар, так и заряженная частица, путешествующая быстрее скорости света в прозрачной среде, производит своего рода удар: свет, испускаемый в виде конуса, который затем освещает стенку контейнера слабым кольцом так называемой радиации Черенкова. Из информации об этой вспышке, длящейся всего несколько миллиардных долей секунды, которая считывается и измеряется огромной решеткой фотоэлектронных умножителей (установлено 11 146 умножителя, каждый имеет 20 дюймов в диаметре, каждому необходима своя электронная индикация), установленных рядами на стенах контейнера, можно узнать о свойствах произведенной частицы. Коэффициент соотношения электронов и мю-мезонов, генерированных при этих столкновениях, колеблется в зависимости от направления падающего нейтрино, и это колебание дает нам возможность узнать массу нейтрино. Для нейтрино, приходящих сверху, этот коэффициент будет выше, чем для нейтрино, приходящих снизу. Все эти нейтрино были генерированы при столкновении космических лучей с атмосферой, поэтому те, что пришли снизу, будут произведены на расстоянии 13 000 км на другой стороне Земли. Единственным объяснением, согласующимся с этими данными, будет то, что некоторые из этих нейтрино во время их прохождения сквозь землю превратились во что-то иное.

Тщательный анализ данных, полученных от Супер-Камиоканде и других экспериментов[3], приводит к заключению, что колебания мю-мезон-нейтрино связаны с чем-то еще, по всей вероятности, с тау-нейтрино, так что происходит постоянный переход от мю-мезон-нейтрино к тау-нейтрино и обратно. Для тех, что падают сверху, проходит слишком мало времени, чтобы совершить для этого заметное уменьшение потока, но для тех, что приходят снизу, времени достаточно, чтобы то, что стартовало как мю-мезон-нейтрино, имело только 50% шансов остаться таковым при считывании детектором. Этот вид колебания известен из другой области физики частиц; частица, называемая нейтральным K-мезоном, также демонстрирует этот специфически квантовый вид поведения. Точнее, существует два разных вида нейтральных K-мезонов, которые колеблются от одного вида к другому и обратно. И такие колебания могут происходить только тогда, когда имеется разница в массе между предполагаемыми состояниями, которые определяют скорость, с которой совершаются колебания. Но невозможно иметь разницу в массе между частицами, не имеющими массы. Отсюда вывод, что масса нейтрино не является нулевой. Все, что можно пока определить, — это ограничение по разнице массы, и следовательно, по массе самого легкого из них. Установлено, что разница в массе превышает 0,07 в единицах (eV/c^2), используемых физиками

(в этих же единицах масса электрона, до сих пор считавшаяся самой маленькой среди элементарных частиц, равна 510,999). Не думайте, что нейтрино являются самым редким и экзотическим видом материи. На каждый электрон во Вселенной приходится миллиард нейтрино, и в каждом кубическом метре пространства содержится 300 млн «реликтовых» нейтрино, оставшихся от большого взрыва. Поэтому тот факт, что нейтрино имеют массу, означает, что они могут внести существенный вклад в общую массу материи во Вселенной. Масса 0,07 e/Vc^2 подразумевает, что общая масса нейтрино во Вселенной сравнима с общей массой видимых звезд! Это имеет важные последствия для космологии[4].

Все вместе — электрон и его подобия в двух других генерациях и их «родственники» нейтрино — называются *лептонами*[5] — название, впервые введенное Абрахамом Паисом и Христином Мюллером. Остальные материальные частицы в каждой генерации называются *кварками*. Это строительные блоки для протонов и нейтронов, из которых состоят атомные ядра, а все другие члены этой обширной семьи частиц называются адронами[6] — это название частиц с высокой степенью взаимодействия. Протоны, нейтроны и т.п. больше не считаются первичными, элементарными частицами. Скорее их можно назвать сложными, построенными из трех кварков[7]. Кварки обладают двумя разными свойствами, называемыми *вкусом* и *цветом*. (Конечно, это только названия, и их ни в коем случае нельзя воспринимать дословно!) В каждой генерации присутствует пара характеристик: *вверх* и *вниз* — в первой генерации, *шарм* и *странность* — во второй и *верхний* и *нижний* — в третьей. Эти довольно странные названия возникли до того, как модель была полностью разработана. Пара вверх/вниз относится к изоспину. Изоспин, математически аналогичный обычному спину, — это вид абстрактной симметрии, изначально введенный в ядерную физику Гайзенбергом. Так же, как обычный спин, частицы со спин-$^1/_2$ может быть описан в квантовой механике на языке двух различных основных состояний, которые мы могли бы представить, как ось спина, указывающую *вверх*, и ось спина, указывающую *вниз*, также есть два различных основных состояния для изоспина-$^1/_2$, называемых по аналогии *вверх* и *вниз*. Но симметрия изоспина не имеет прямой связи с обычным пространством — она относится к абстрактному виду внутреннего пространства, используемого для описания частицы. Теория физики высоких энергий изобилует такими «внутренними симметриями».

Симметрия играет огромную роль в физике высоких энергий, как эстетическую, так и практическую. Природа полна бесчисленными примерами симметрии, например (приближенная!), лево/правосторонняя симметрия наших тел или чистая симметрия кристалла. Некоторые, как эти, проявляются таким образом, что мы можем видеть их непосредственно, как это происходит с зеркальным отражением или симметричным переводом рисунка на обоях или паркетном полу. Существуют другие, более абстрактные виды симметрии, лучше всего описываемые математическими выражениями, которые помогают классифицировать и объяснять физику атомов и субатомный мир физики частиц[8]. Эти симметрии часто позволяют нам понять, что две или бо-

лее частицы, которые вначале могли показаться совершенно различными, на самом деле являются разным проявлением одной и той же вещи. Это очень похоже на признание того, что символы ≻ ≺ ⅄ Y связаны друг с другом симметрией и поэтому могут рассматриваться как разные проявления одной и той же формы.

Есть симметрии, которые действуют между генерациями, а не внутри их, но они не считаются фундаментальными. Одной такой симметрией является знаменитая симметрия «восьмикратного пути» SU(3), предложенная Гелл-Маном, который значительно упростил и упорядочил феноменологию адрона. Такие симметрии являются следствием более базисных свойств стандартной модели. У кварков есть масса, которая также вводится в модель вручную. Фактически «верхний кварк» является таким массивным, что его производство доступно только самым мощным ускорителям из когда-либо построенных до настоящего времени; Его существование было подтверждено только в 1995 году, и его масса превышает массу целого атома вольфрама (цветная иллюстрация 16). Возможно, самый большой вызов, брошенный физике частиц, заключается в том, чтобы понять, почему массы кварков имеют такой широкий диапазон изменений: «верхний» кварк в 35 000 раз массивнее самого легкого «вверх»-кварка. Раскрыть происхождение этих масс — вот одна из главных целей первых экспериментов, предложенных для LHC (большого ускорителя адронов).

Кварки несут электрический заряд; используя единицы, в которых заряд электрона равен –1, кварки «вверх», «шарм» и «верхний» будут иметь заряд $+^{2}/_{3}$, в то время как кварки «вниз», «странный» и «нижний» заряд $-^{1}/_{3}$. Следовательно, все они вступают в электромагнитные взаимодействия, и подобно лептонам они также принимают участие в слабых взаимодействиях. Эти два вида взаимодействия имеют очень разные свойства: электромагнитные взаимодействия во много раз сильнее, чем их слабые двойники, и их сила при разделении убывает медленно, в то время как слабые взаимодействия — кроме того, что они ничтожно малы — имеют очень узкий диапазон. Но примечательно, что оба вида являются двумя разными сторонами одного и того же унифицированного взаимодействия, причем *электрослабого взаимодействия*. Унификация электромагнетизма и слабые взаимодействия заработали Нобелевскую премию для пакистанского физика Абдуса Салама и американцев Стивена Уайнберга и Шелдона Глэшоу. Это значит, что фотон, как медиатор электромагнетизма, и спин-1-бозоны, связанные со слабыми взаимодействиями, являются «единокровными братьями». То есть на очень коротких расстояниях свойства частицы отступают от прогнозов квантовой электродинамики. Существуют едва различимые влияния, которые действительны даже для атомной физики, и эти влияния были реально измерены.

Возможность унификации электромагнетизма и слабых взаимодействий, несмотря на легкость фотонов и тяжеловесность слабовзаимодействующих бозонов (они имеют стократную массу протона!), появилась благодаря чуду, названному *спонтанным разрушением симметрии*. Считается, что при

высоких энергиях симметрия между электромагнетизмом и слабыми взаимодействиями проявляется очень четко: мы не увидим никакого различия между ними, и бозоны, служащие связующим звеном между ними, будут все, как фотон, иметь нулевую массу. Но при более низких энергиях симметрия спонтанно разрушается во время фазового перехода, аналогичного тому, который случается, когда жидкость затвердевает по мере охлаждения. Например, вода является изотропной — то есть у нее нет какого-то одного направления в расположении ее молекул. Но в кристаллах льда молекулы расположены в правильных плоскостях, которые благодаря тому, что выровнены в одном и том же направлении, разрушили симметрию вращения, наблюдаемую при высоких температурах. Следствием такого же фазового перехода в электрически ослабленном поле является разрушение, но не симметрии в пространстве, а внутренней симметрии во взаимодействиях, и в этом процессе бозоны, ассоциируемые со слабыми взаимодействиями, приобретают некую массу, а действительная сила взаимодействия становится слабой. Из этого сценария вытекают подробные прогнозы, которые во время экспериментов подтверждены эффектами, и не в меньшей степени — существование массивных бозонов, посредничающих при слабых связях, а также их точная масса и другие свойства. Эти бозоны называются *W* и *Z*, и они были открыты в 1983 году во время экспериментов в лаборатории CERN под руководством итальянца Карло Руббиа. Эти эксперименты ориентировались на получение намного более высоких эффективных энергий при столкновении частиц, чем энергии, полученные ранее при облучении фиксированной цели пучком протонов. Вместо этого обеспечивалось прямое столкновение высокоэнергетичных пучков протонов и антипротонов, ставшее возможным благодаря концентратору лучей, разработанному датским физиком-инженером Симоном ван дер Меером. За это достижение Руббиа и ван дер Меер в 1984 году получили Нобелевскую премию. Руббиа возглавил команду из 100 физиков, управляя ею железной рукой, при этом совершая регулярные трансатлантические перелеты для выполнения своих преподавательских обязанностей в Гарварде.

Кварки, как приличествует строительным блокам гадронов, также интенсивно взаимодействуют. Спин-1-бозоны, посредничающие в этих взаимодействиях, называются глюонами (более молодое поколение физиков было менее оригинальным в придумывании названий для частиц!), — они склеивали вместе кварки внутри протонов, нейтронов и других наблюдаемых адронах. Тонкости этой части модели просто удивительны. Например, протон состоит из двух «вверх»-кварков и одного «вниз»-кварка. И все же, чтобы такая конструкция стала возможной, кроме наблюдаемых свойств протона и других адронов, связанных с ним, у кварков должна быть еще какая-то особенность. Для каждого из шести вкусов кварка, перечисленных нами (вверх, вниз и т. д.), имеется три разных *цвета,* так что известно три «вверх»-кварка, отличающихся только по цвету, три «вниз»-кварка и т. д. Тогда получается хорошо «смонтированная» цельная конструкция, и хотя кварки, как говорилось ранее, имеют дробные заряды, составленные из них гадроны уже имеют

целые заряды. Ключом ко всему этому является участие глюонов; они взаимодействуют только с цветом, так же как и лептоны, будучи сами бесцветными, и вообще не вступают в интенсивное взаимодействие.

Еще одна особенность субъядерного мира также имеет решающее значение для данной модели. Существует восемь различных видов глюонов, которые сами имеют цвет и поэтому взаимодействуют друг с другом. Из-за особого способа их взаимодействия напряжение между окрашенными частицами, кварками, или глюонами, увеличивается при увеличении их разделения, и наоборот, становится слабее на коротких расстояниях. Такая сила ранее не была известна. В результате цвет *ограничивается,* поэтому мы никогда не видим свободного кварка, отделенного от других, так же, как и свободного глюона. Ни одна из наблюдаемых частиц не имеет цвета, потому что цвета их составляющих стерты. Вследствие этого ни одна из непосредственно наблюдаемых нами частиц не несет дробного электрического заряда, как кварки. Хотя они не обнаруживаются и, может быть, их, как свободные частицы, обнаружить невозможно, экспериментальные свидетельства существования кварков и глюонов, свойства которых я попытался описать, впечатляют. Теория сильных взаимодействий, основанная на кварках и глюонах, имеет много общего с КЭД, испытанной и внушающей доверие отправной точкой для релятивистской квантовой теории поля. Она называется квантовой хромодинамикой (КХД).

Мое описание стандартной модели почти закончено. Кратко повторим: материя организована в три генерации, которые кроме очень разных масс являются почти точными копиями друг друга. В каждой генерации имеется пара лептонов и три пары кварков, и все эти восемь частиц являются спин-$^1/_2$-фермионами. Я бы добавил, что у каждой из них есть соответствующая античастица с противоположной характеристикой и противоположным цветом. Силы ассоциируются со спин-1-бозонами: большая сила — с восемью глюонами без массы, электромагнетизм — с фотоном, также без массы, а слабая сила — (позвольте мне теперь назвать их) с частицами W^+, W^- и Z°.

Боюсь, что мое краткое описание модели получилось весьма специфическим. Для точности были описаны некоторые ее особенности, чтобы соответствовать фактам, — так сказать, чтобы «спасти положение» (например, число генераций или массы кварков). Что мне не удалось передать (так как для этого потребовались бы многочисленные математические выкладки), так это то, что в действительности вся схема очень хорошо организована и дает очень мало свободы для внесения поправок. Разгадка этого кроется в природе сил, бозонах, которые несут их, и полях, квантами которых они являются. Все они связаны с *калибровочными симметриями,* и как уже упоминалось, именно это свойство гарантирует, что теория способна к перенормировке. Основная симметрия является очень простой по сути[9], причем настолько, что требуется только три константы, чтобы определить *все* взаимодействия.

Также удается с помощью трех генераций простым способом ввести наблюдаемое разрушение паритетной (левая/правая) симметрии и совсем небольшой эффект, который соотносится со свойством асимметрии между

материей и антиматерией во Вселенной. Что касается первого эффекта, то при отсутствии разрушения этой симметрии основные взаимодействия будут происходить точно таким же образом для любой данной системы, как и для ее зеркального отражения. И в самом деле, в большей части ежедневных ситуаций это случается именно так; если я могу построить машину для изготовления правосторонних винтов, я могу построить и ее зеркальный вариант, который будет делать левосторонние винты. Но в природе существуют левая/правая асимметрии. Наиболее знакомой из них является перевес «правшей» над «левшами» среди людей, но это может быть всего лишь результат случая в ходе эволюции. Возможно, более важным является тот факт, что многие молекулы, участвующие в метаболизме живых существ, являются «левшами» или «правшами»; то есть зеркальное изображение не имеет тех же свойств, какими обладает оригинал. Все аминокислоты в живых организмах являются левосторонними. Виноградный сахар, декстроза, отличается от своего зеркального двойника левулезы; мы легко усваиваем декстрозу, но не ее правостороннего двойника. Космическая бета-радиация поляризована, и некоторые свидетельства предполагают, что она могла разрушить преимущественно правосторонние аминокислоты. Так что возможно, что преобладание одной из сторон в молекулах нашего тела является результатом крошечной асимметрии в динамике, связанной с нарушением паритета. Забавно думать, что молекулы, позволяющие отличать вкус апельсина от вкуса лимона, являются зеркальным отражением друг друга. В мире, где нет нарушения паритета, будут ли лимоны и апельсины одинаковыми на вкус?

Нарушенная паритетная симметрия часто обозначается буквой *P*, и существуют еще две симметрии, которые, подобно *P*, нарушаются слабыми взаимодействиями. Одна обозначается как *C*, сопряжение по заряду; она не нарушается сильными и электромагнитными взаимодействиями, которые остаются неизменными, если каждый заряд замещается на противоположный. И наконец, есть симметрия *T*, которая является гораздо более тонкой. *T* относится к обратному ходу времени, и симметрия обратного хода времени означает, что каждому возможному процессу может соответствовать еще один, описываемый теми же величинами, но с обратным направлением стрелы времени. В классической физике это вызвало бы ассоциацию с прокручиваемой назад пленкой; если первый фильм показывает удар бильярдного шара, то же самое будет в обратном по времени варианте — и те же самые законы физики будут применимы к ним обоим. Одним из самых значительных выводов квантовой теории поля является то, что комбинация *CPT*-симметрий всегда представляет неразрушенную симметрию. То, что как *C*-, так и *P*-симметрии раздельно разрушаются слабыми взаимодействиями, было обосновано китайско-американскими теоретиками Чен-Нин Янг и Цун-Дао Ли в 1956 году (прошлом году они получили за эту работу Нобелевскую премию) и впервые проверено Чен-Шун Ву, американкой китайского происхождения, а спустя короткое время — и ее коллегами.

И все же комбинация *CP*, а следовательно, также и *T*, может оставаться по-прежнему неразрушенной. Но эксперимент Джеймса Кронина и Вэла Фитча в Принстоне в 1963 году, результаты которого были опубликованы только в следующем году после продолжительной аналитической проверки его ошеломляющего результата, показал, что даже эти симметрии, хотя и слабо, но разрушаются. (За эту работу Кронин и Фитч также получили Нобелевскую премию в 1980 году.) В их эксперименте производилось искусное квантовое смешивание, эффект которого демонстрировали нейтральные K-мезоны[10]. Измерять параметры нарушения CP очень трудно, поэтому планируется проведение новых экспериментов, которые установят их значение более точно с помощью детекторов, специально разработанных для этой цели. Один из них называется BaBar (BB), и он начал снимать показания в 1999 году (рис. 8.4). Эти данные будут использованы для изучения квантового смешивания между *B*-мезонами и их античастицами *B*, которые аналогичны *K* и *K*-нейтральным *K*-мезонам, исследованным Кронином и Фитчем.

Напоследок я оставил еще один существенный недостающий элемент, который необходим, чтобы связать в единое целое стандартную модель. Мы

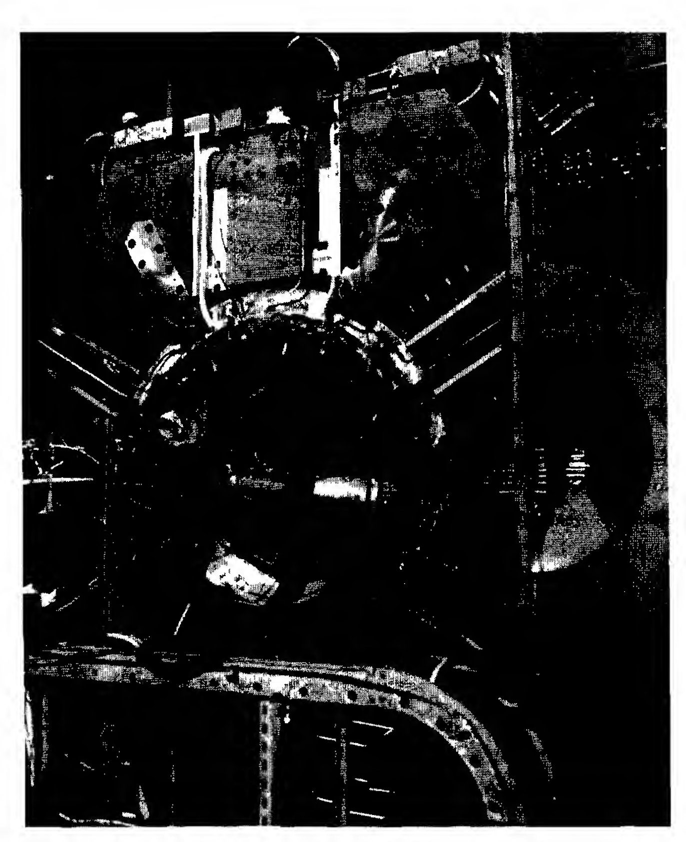


Рис. 8.4. BaBar, детектор Лаборатории линейного ускорителя Стэнфордского университета. (Фотография Джо Фауста/SLAC.)

уже говорили о спонтанном разрушении симметрии. Симметрия, которая управляет электрослабыми взаимодействиями, могла бы на первый взгляд означать, что все четыре задействованных бозона, то есть то, что фотон и W^+, W^- и Z^0 не должны иметь массы и будут взаимодействовать тем же способом, вследствие чего слабые взаимодействия не будут слабыми и не будут иметь наблюдаемые у них очень узкие диапазоны. Недостающей составляющей является еще одна частица — бозон с нулевым спином. Она вступает в теорию так, что, хотя основная структура имеет высокую степень подразумеваемой симметрии, эта полностью симметричная структура является в своей основе *неустойчивой*. По прогнозам, при очень высоких энергиях симметрия действительно становится очевидной. В самом деле, на самых первых этапах существования Вселенной, когда необычайно высокие температуры, вызванные большим взрывом, заставляли частицы сталкиваться друг с другом при очень высоких энергиях, она действительно *была* очевидной. Но при относительно низких энергиях наших даже наиболее мощных ускорителей симметрия нарушается, и неустойчивость приводит взаимодействие к менее симметричной, но более устойчивой конфигурации. Эта лишь вероятность, и роль бозона с нулевым спином была впервые описана Питером Хигсом. Поиск бозона Хигса, недостающей части картинки-головоломки, является одним из главных стимулов для перехода к следующему поколению ускорителей частиц, которые начнут сбор данных в начале этого века. Как раз перед закрытием в ноябре 2000 года, чтобы начать строительство LHC, появились сообщения, что на ускорителе LEP (большой электронный позитрон) в лаборатории CERN были замечены «дразнящие», мимолетные видения того, что может быть было бозоном Хигса. Мы не знаем массу мнимого, неуловимого бозона Хигса; но экспериментальные ограничения и теоретическое предубеждение и, вероятно, элемент принятия желаемого за действительное, приводят к мысли о том, что его получение должно быть возможным на LHC (большом адронном ускорителе), возводимом в CERN, и его должна затем обнаружить гигантская детекторная решетка весом 7000 тонн и высотой с пятиэтажное здание, строящаяся по проекту ATLAS. Обнаружение бозона с нулевым спином не только поддержит стандартную модель с ее гармоничными и регулярно прогнозирующими способностями; он также прольет свет на происхождение массы. Потому что взаимодействия бозона Хигса тесно связаны с массами частиц и предполагается, что исследования этих взаимодействий будут занимать лидирующее положение в программе экспериментов с высокими энергиями в первые десятилетия двадцать первого века. Так или иначе, они обязательно дадут ключи к решению загадки массы, потому что именно благодаря взаимодействию с бозоном Хигса частицы стандартной модели приобретают массу при спонтанном разрушении симметрии.

Чтобы получить бозон Хигса, требуется обеспечить столкновение частиц при очень высоких энергиях, и при таких столкновениях будет создаваться множество других, более знакомых частиц. Было подсчитано, что во время обычных столкновений создаются сотни частиц, а каждую секунду происхо-

дит около миллиарда таких столкновений. Отслеживание этих частиц, определение их кинематики и исследование каждого процесса столкновения, надеясь найти то, в котором был создан бозон Хигса, является феноменальным вызовом. Поток данных от детекторов будет таким же огромным, как от трех миллиардов музыкальных компакт-дисков, играющих одновременно, и из всей этой какофонии нужно будет выбрать только одну значимую мелодию бозона Хигса. Скоростная электронная техника, необходимая для достижения этой цели, была разработана совсем недавно, но она несомненно найдет применение за пределами мира физики высоких энергий. В конечном итоге прежние разработки в области электроники и обработки данных, предназначенные для физики высоких энергий, нашли себе применение в таких разнообразных сферах, как медицина, промышленное производство, развлечения и коммуникации.

При всей ее организующей способности, компактности, малочисленности предположений и большого количества прогнозов, стандартная модель остается незавершенной. Прежде всего она указывает на существование более широкого единения, между сильными взаимодействиями и уже обобщенными электрически слабыми взаимодействиями. Экстраполяция по характеру изменения силы взаимодействий по мере увеличения энергии столкновений позволяет нам верить, что такая унификация может случиться на самом деле. Своего выхода на сцену ждут великие унифицированные теории (*GUTs*), которые готовы к использованию, как только доказательства станут более убедительными. *GUTs* играют важную роль в современной космологии, к которой мы вернемся в главе 11.

Еще одна унификация, еще более дерзкая, но на которую намекают эксперименты и которая привлекательна для теории, возможна между материей (как она представлена элементарными фермионами) и силой (бозонами). Такой сверхсимметрии может потребоваться целый ряд новых частиц, слептонов и скварков, фотионов и глюионов. Ни одна из них еще не найдена, предположительно потому, что все они имеют слишком большую массу, чтобы их можно было получить на современных ускорителях. Однако экстраполяция по измерениям, произведенным на сегодняшний день, дает основание считать, что действительно происходит масштабная унификация, и это делает более правдоподобной гипотезу существования сверхсимметрии. Не является ли все это некой экзотической фантазией? Может быть. Но в следующей главе мы увидим, что сверхсимметрия необходима как составляющий элемент для перехода струн в суперструны и тем самым для создания того, что, по общему признанию, является единственной теорией, которая признает логичную квантовую теорию тяготения. Несмотря на ее огромные успехи в описании элементарных частиц материи и сил их взаимодействия, стандартная модель является незавершенной. Ни одно из основных объяснений материи и ее взаимодействий не может исключить силы тяжести, а стандартная модель даже не упоминает об этой универсальной силе. Выйти за пределы стандартной модели — этого требует теория суперструн.

ЧАСТИЦЫ СТАНДАРТНОЙ МОДЕЛИ

Фермионы

Генерация	Первая	Вторая	Третья
Кварки	*U*	c	t
	D	s	b
Лептоны	*E*	μ	τ
	υ_e	υ_μ	υ_τ

Кварки обозначены их инициалами: up, down, charm, strange, top, bottom. Каждый вид имеет три «цвета». Лептонами являются соответственно: электрон, мю-мезон и тау, и их соответствующие нейтрино.

Бозоны

Взаимодействие	Носитель силы
Электрослабые	$W^+, Z^0\ W^-$
Сильные	g

Имеется восемь разных глюонов (обозначенных «*g*»), которые взаимодействуют с кварками и друг с другом.

$W^+, Z^0\ W^-$ и γ (фотон) взаимодействуют с разными видами электрически слабозаряженных частиц.

И наконец, сам по себе существует бозон (*H*) Хигса.

ГЛАВА 9

ТРУДНЫЕ ВОПРОСЫ

Общая теория относительности

Что такое сила тяжести? Ньютон утверждал, что «всем телам присуща сила тяжести, пропорциональная нескольким единицам количествам материи, которую они содержат» и которая изменяется «обратно пропорционально квадрату расстояния». Что же касается ее причины и ее истинной природы, он был намеренно уклончив: «Но до сих пор я не смог раскрыть причину свойств из явлений и не составил никакой гипотезы; ибо все, что не выводится из явлений, следует называть гипотезой.... И нам достаточно того, что сила тяжести существует и действует по законам, которые мы объяснили, и в полной мере служит для объяснения всего движения небесных тел, и нашего моря». (Он ссылается здесь на свое объяснение причин приливов.)

Эти представления оставались неизменными до 1915 года — большая часть метафизики и многое, чем издавна пользовалась астрономия, а также другие области физики, но с ничтожными результатами для фундаментальной теории — до 1915 года. Именно в этом году Эйнштейн опубликовал свой наиболее радикальный труд — общую теорию относительности.

Сила тяжести — это то, что мы испытываем как вес. Неважно, что рассказ о Галилее, бросающем разные предметы с Падающей башни в Пизе, вероятно, является апокрифом — так или иначе, он действительно открыл, что сила тяжести действует на разные массы с одинаковым ускорением. Вследствие этого, когда космический аппарат находится в свободном полете вокруг Земли, при свободном падении на Землю все его содержимое, также находясь в свободном падении, ускоряется одинаково. (Да, орбита корабля действительно является местом свободного падения; вызванное гравитацией ускорение, направленное к центру Земли, является именно тем, что необходимо для удержания корабля на круговой орбите — так же, как натяжение веревки с камнем, привязанным на ее конце, поддерживает круговое вращение камня.) Вес, как мы его ощущаем, — это та сила, которая притягивает нас к центру Земли и тянет вниз. Без противодействия эта сила действительно ускоряла бы наше движение вниз, как это бывает при прыжке или падении. Чтобы противодействовать ей и удерживать себя в нужном положении, нам нужна сила сопротивления, как, например, давление на подошвы наших ног или сжатие пружины в весах. Именно такую противодействующую силу мы используем обычно для измерения веса; поэтому когда в космическом корабле такая сила не нужна его обитателям для сохранения состояния покоя относительно их окружения, мы говорим, что они находятся в состоянии невесомости. Это не

значит, что сила тяжести — их вес — исчезла; просто обычные следствия этой силы (давление на подошвы ног или падение на пол) были отменены ускорением, которому они и их корабль подвержены при совместном падении во время вращения вокруг Земли. Точно так же вам кажется, что ваш вес изменяется в скоростном лифте при его движении вверх или вниз[1]. Встаньте на весы во время поднятия лифта, если вам нужны дополнительные доказательства, кроме знакомых ощущений в желудке!

Что интересно, Эйнштейн, пытаясь разрешить проблему силы тяжести, поместил эти простые наблюдения в центр своей теории. Уже в 1907 году, еще работая в патентном бюро в Берне, он был поражен одной идеей: «Если человек находится в свободном падении, он не будет чувствовать своего веса». Это зародыш принципа равносильности, который утверждает, что силы тяжести являются неотличимыми по своему воздействию от тех, которые мы ощущаем при ускорении системы отсчета (лифта, космического корабля, шаткого поезда). Его цель была поставлена: устранить ограничение, которым он воспользовался в своей специальной теории относительности, а именно: что она относится только к описанию событий наблюдателями, находящимися в относительно неускоряемом движении, при этом любые два наблюдателя будут согласны, что при отсутствии воздействующих сил тела продолжают двигаться с постоянной скоростью. Теперь он хотел расширить свои законы трансформации так, чтобы иметь возможность заниматься более общими понятиями относительного движения между разными наблюдателями. Принцип равносильности уже предполагает, что возникающая в результате теория должна будет иметь дело с силой тяжести, и фактически обеспечит силам гравитации привилегированное положение.

Эйнштейн также утверждал, что любая теория, достаточно общая, чтобы охватывать относительно ускоренных наблюдателей, будет делать выводы, необходимые для понимания пространства и времени, и дал простой пример, почему это должно быть именно так. Частным примером ускоренного движения является движение по кругу. Любое другое движение без постоянной скорости (то есть без постоянной скорости по прямой линии), является ускоренным. Движение по кругу, даже с постоянной скоростью, подразумевает ускорение, так как направление движения изменяется. Предположим, что наблюдатель в центре вращающегося диска производит измерения, чтобы определить его диаметр; результат будет таким же, как при неподвижном диске. Но если теперь наблюдатель на вращающемся диске будет измерять его окружность, она окажется меньше, чем у неподвижного диска. Это следствие сжатия Лорентца-Фитцджеральда, которое сокращает длину в направлении движения. Однако длина радиуса остается неизменной, так как скорость каждого участка радиуса перпендикулярна его длине. В результате воспринимаемое отношение окружности к диаметру будет меньше, чем у диска в состоянии покоя. Следовательно, наблюдатель обнаружит, что отношение окружности к диаметру не равно π, чего требует евклидова геометрия! Тот же наблюдатель вращающегося диска заметит, что часы, установленные на окружности диска, идут медленнее по сравнению с часами в центре.

Невозможно обосновывать на вращающемся диске общее описание явлений пространства-времени, которое соответствовало бы принципам специальной теории относительности, и тем более принципам Ньютоновой физики и теории относительности Галилея: так как линейки укорачиваются, а часы замедляют ход при перемещении от центра к окружности диска. По сути дела, ни один наблюдатель, с любой точки зрения, не может дать описание, которое было бы верным для всего диска и соответствовало бы евклидовой геометрии и данным синхронизированных часов. Однако наблюдатель на вращающемся диске испытывает воздействие центробежной силы, а принцип равносильности говорит нам, что это должно иметь такой же эффект, как воздействие идентичной силы тяжести. «Итак, мы пришли к выводу: гравитационное поле влияет и даже устанавливает метрические законы пространственно-временного континуума. Если потребуется геометрически выразить законы конфигурации жестких тел, тогда, при наличии гравитационного поля, геометрия будет не евклидовой».

Понятно, что гравитация Ньютона должна как-то найти свое место в новой теории, и она его нашла, хотя и в форме приближения, имеющего силу в тех случаях, когда гравитационные ускорения являются не слишком большими, а относительные скорости не слишком высокими. Источником Ньютоновой гравитации является масса, масса идеализированных материальных частиц, которые Ньютон считал конечными составляющими элементами материи. При обобщении, при условии особого внимания к распределенной массе, а не концентрации массы в виде частиц, источником гравитации в теории Ньютона становится плотность массы, отношение массы к объему. Так как специальная теория относительности Эйнштейна уже показала взаимозаменяемость массы и энергии (снова $E = mc^2$!), в релятивистской теории гравитации плотность энергии, по-видимому, могла бы служить источником гравитации. Но в специальной теории относительности плотность энергии не входит в теорию самостоятельно: она является частью комплекса из десяти величин (включая, например, плотность количества движения), которые преобразовываются вместе. Их значения будут разными для двух наблюдателей, движущихся относительно друг друга, но правила перехода от одного наблюдателя к другому являются совсем простыми и характеризуются тем, что называется *тензором*. Итак, Эйнштейн хотел создать теорию гравитации, источником которой был бы тензор. Он также хотел получить теорию, в которой законы физики можно было выражать одинаковым способом, независимо от того, в каком относительном движении наблюдателей и в какой системе отсчета эти законы применяются. (Выражаясь математическим языком, это вызывает техническое требование, чтобы законы физики были ковариантны в условиях самых общих преобразований системы координат.)

Теперь Эйнштейн сосредоточил свое внимание на новой проблеме: что значит изменить систему отсчета, изменить способ названия событий пространства-времени? Специальная теория относительности смогла выделить место только для ограниченного класса таких изменений, но теперь Эйнштейн пытался разрешить задачу изменения системы координат в общем.

Рене Декарт показал, как удобно представить плоскость, покрытую сеткой перпендикулярных линий, и нам теперь известны декартовы координаты по картам и миллиметровой бумаге. Точка на карте и ее двойник на поверхности Земли идентифицируются двумя числами — долготы и широты. На карте большого масштаба, охватывающей совсем небольшой участок, линии север-юг и запад-восток действительно сильно приближены ортогональными комплектами прямых линий; но, как признавали Меркатор и другие великие картографы, невозможно отобразить на карте всю поверхность Земли, или даже ее большой участок, без искажений. Гренландия может оказаться такой же большой, как Африка (рис. 9.1).



Рис. 9.1. Гренландия кажется больше Африки на этой проекционной карте Меркатора. (С любезного согласия Graphic Maps, Galveston, Texac.)

Это значит, что действительное расстояние между двумя точками на Земле не пропорционально их разделению на карте и требует поправок, которые зависят от месторасположения. Самое короткое расстояние между двумя точками на Земле не будет отражено на карте прямой линией, а большие кольцевые маршруты на полетной карте кажутся изогнутыми. В этих свойствах географических карт зашифрован тот факт, что поверхность Земли изогнута; ей присуща кривизна сферической поверхности. В отличие от поверхности цилиндра (который можно разрезать по линии, параллельной его оси и развернуть в плоскость без растяжения или искажения), поверхность сферы можно перевести в плоскость только с некоторой степенью искажения. Эйнштейн хотел рассмотреть общие трансформации между разными метками — разным выбором координат — точек пространства-времени, трансформации, которые были такого вида. В его теории пространство-время имеет свойственную ему кривизну. Это зашифровано таким способом, что разница между событиями определяется разницей в их координатах (метки времени и пространства), так же, как присущая кривизна Земли зашифрована в линей-



ках картографов для определения расстояний, исходя из разноса широты и долготы.

Тогда что же определяет кривизну пространства-времени? Математическое описание кривизны было начато Карлом Фридрихом Гаусом[3] и продолжено в его исследованиях двухмерных поверхностей и затем анализе более высоких размерностей Бернардом Риманом в знаменитой «пробной» лекции, которую он прочел в Геттингене в 1854 году, до назначения его на столь желанную, но неоплачиваемую должность лектора в университете. Исчисление тензора, разработанное Риманом и другими для этой цели, ни в коей мере не было частью математического багажа физиков-теоретиков первых десятилетий века. Хотя Эйнштейн признавал, что оно дало ему ключ к решению его проблемы, он наталкивался на многочисленные ловушки и терпел поражения во многих ошибочных испытаниях во время поиска пути для обеспечения общей ковариантности и чуть было не потерпел поражение из-за трудностей, связанных с математикой. Прошло восемь лет, прежде чем в 1915 году был опубликован окончательный результат, названный «Уравнения поля гравитации». В 1919 году, в конце предисловия к научной статье, в которой он представил эту теорию в сокращенном варианте, он писал: «Магию этой теории почувствует каждый, кто поймет ее; она представляет собой настоящий триумф метода абсолютного дифференциального исчисления, основанного Гауссом, Риманом, Кристоффелем, Риччи и Леви-Чевита». В течение года он опубликовал окончательную редакцию теории и уже определил три главных ее предсказания, которые отличались от предсказаний физики Ньютона.

Первым из них является *гравитационный сдвиг к красному спектру*, который можно понимать следующим образом: фотон имеет энергию, пропорциональную частоте данного света. Если он пойдет «вверх», то есть против силы тяготения, он потеряет энергию, и частота света уменьшится, что означает, что цвет света будет сдвигаться к красному концу спектра. По этой причине частотные характеристики спектральных линий солнечного света являются более красными, чем соответствующие линии от источника света на Земле, так как, чтобы достичь нас от поверхности Солнца, свет должен вырваться из огромного поля притяжения Солнца. Сдвиг составляет всего четыре миллионных и его очень трудно отличить от других влияний, которые также могут вызвать небольшие изменения в наблюдаемых частотах, поэтому более точные наблюдения гравитационного сдвига к красному вынуждены были ждать появления новых технологий, которые могли бы измерять очень маленькие величины сдвига, предсказанного для земного эксперимента. Впервые эта цель была достигнута в конце 1950-х, когда Роберт Паунд и Глен Ребка измерили изменение частоты (всего на $2/10^{15}$) между верхом и низом 22-метровой башни в Гарвардском университете. Сдвиг оказался точно таким, каким он был предсказан почти полвека назад.

В шестнадцатом веке Иоганн Кеплер на основании удивительно точных и подробных записей Тихо Брахе о движениях планет по небесному своду пришел к заключению, что эти «блуждающие звезды» кружат вокруг Солнца по *эллиптическим орбитам*. (Тихо был датчанин знатного происхождения; у него

не было телескопа, но в его замке, в Ураниборге была обсерватория с квадрантами, секстанами и другими интрументами. Работа в обсерватории велась за счет доходов с его поместий и пошлин с торговли на Балтике, подкрепляемых субсидиями и грантами от датской короны; общие затраты составляли частицу от национального ВВП, как взнос современной Дании в проект CERN.) Теория гравитации Ньютона объясняет эллиптические орбиты планет и даже небольшие поправки вследствие того, что каждая планета влияет на движение всех других. Наиболее заметным является воздействие на Меркурий; это самая легкая из планет с довольно эксцентричной орбитой, которую она обходит за 88 дней. Ее перигелий (точка наибольшего сближения с Солнцем) находится в слегка отличающемся от Солнца направлении от одного круга орбиты до следующего; это постепенное изменение в направлении называется опережением перигелия. Оно было известно Урбану Ле Верьеру в 1850-х, и было определено с большей точностью Симоном Ньюкомом в 1880-х. Оно равно 5,599 сек дуги за век. Поправки Ньютона дают величину 5,556 сек; общая теория относительности объясняет разницу между этими двумя величинами. Это было вторым «классическим испытанием общей теории относительности».

Гравитационный сдвиг к красному спектру уже показывает, что гравитация влияет на свет, поэтому, может быть, не так уж и удивительно, что лучи света отклоняются гравитацией. Мяч летит по параболической кривой, когда падает в поле земного притяжения; планеты падают, кружась вокруг Солнца по эллиптическим орбитам; следовательно, почему же лучи света от далеких звезд не могут быть отклонены, если проходят близко к Солнцу (где сила притяжения так сильна), на пути к нам? Можно произвести простое вычисление, обращаясь с светом, как с материей, которое привело к такому предсказанию; теория Эйнштейна 1915 года подтвердила, что такое влияние может быть, но дала величину, в два раза большую, чем была в его ранних вычислениях. После краткого размышления становится понятно, что измерить эту величину не так просто; прежде всего это влияние небольшое (даже для лучей, которые всего «царапают» край Солнца во время путешествия от звезды к нам, оно составляет всего 1,75 сек дуги). Но в любом случае, чтобы видеть звезды в направлении, близком к направлению Солнца, необходимо проводить наблюдения в дневное время, когда яркость рассеянного света от неба делает звезды невидимыми! Однако звезды действительно появляются на небе во время полного затмения Солнца. Научная работа Эйнштейна появилась в 1915 году, когда Европа отнюдь не была озабочена такими мирными делами, как наблюдение за звездами. Пользуясь ранними вычисления Эйнштейна, группа немецких астрономов в 1914 году, накануне войны, отправилась в Россию наблюдать полное затмение Солнца. Эйнштейн писал Паулю Эренфесту: «Европа в состоянии безумия, началось что-то невероятное.... Мой дорогой астроном Фрейндлих [глава экспедиции] станет военнопленным в России, вместо того чтобы наблюдать там затмение Солнца. Я беспокоюсь о нем». Члены экспедиции действительно на короткое время были в плену, пока их не обменяли на несколько русских офицеров.

Еще одно полное затмение было предсказано в 1919 году. Сэр Артур Эддингтон, один из ведущих астрономов того времени, был квакером и пытался урегулировать разногласия в отношениях между британской и германской наукой, наблюдавшиеся в военный период. Уже в 1917 году он строил планы по организации наблюдений с территории Бразилии и с острова в Гвинейском заливе. В своей книге «Пространство, время и гравитация» он писал:

Во времена засилья предрассудков философ-натуралист, желая осуществить важный эксперимент, шел к астрологу, чтобы определить благоприятный момент для опыта. Имея более веские основания, современный астроном, советуясь со звездами, сказал бы, что наиболее благоприятный день в году для «взвешивания» света — 29 мая. Дело в том, что Солнце на своем ежегодном пути по эклиптике проходит через звездные участки различного свойства, но в день 29 мая оно будет находиться в середине участка, в котором громадное количество ярких звезд, — часть Гиад — самого лучшего из когда-либо наблюдаемых звездных полей. Если бы эта проблема существовала в какой-нибудь другой период истории, возможно, нужно было бы ждать тысячи лет, прежде чем полное затмение случилось именно в этот день. Но по счастливому стечению обстоятельств оно действительно случилось 29 мая 1919 года[4].

Облака, закрывавшие солнце, рассеялись вовремя, и можно было произвести измерения. Фотография, сделанная в течение этих нескольких минут полного затмения, показала, что звезды, находившиеся близко к Солнцу, были действительно смещены со своих позиций относительно тех, которые были дальше от Солнца — точно так, как это предсказывает общая теория относительности, то есть на величину, в два раза большую, чем давало раннее «ньютоновское» вычисление. Следует заметить, что такие наблюдения являются очень сложными и часто подвержены ошибкам, так что даже если принять во внимание наблюдения, сделанные во время других солнечных затмений за последние 80 лет, то скептики до сих пор могли бы сомневаться в том, что полученные результаты подтверждают теорию. Однако в настоящее время можно производить аналогичные измерения с помощью радиотелескопа, наблюдая затенение квазара и не ожидая полного затмения. И точность соответствия между теорией и наблюдением превышает 2%.

К трем «классическим» испытаниям было добавлено четвертое, предложенное и проведенное Ирвином Шапиро в 1960-х. Время, затрачиваемое светом на его «путешествие», испытывает влияние гравитации; и снова кривизна пространства-времени, вызванная Солнцем, может быть измерена. Используя очень мощные передатчики и чувствительные детекторы, можно записать эхо импульса радара, отраженное от планеты, и проследить изменение за время задержки между передачей и обнаружением эха при наибольшем сближении планеты с Солнцем. Снова теория и наблюдение согласуются в удовлетворительной степени, но все же не так убедительно, чтобы поколебать неизменный скепсис. Наблюдательная база для признания общей тео-

рии относительности была хорошей, но реальная сила теории заключалась в ее внутренней логике и последовательности.

Ситуация изменилась за последние несколько лет. Благодаря наблюдениям системы, открытой в 1974 году, проводившимся на протяжении двадцати лет, общая теория относительности была подвергнута еще более энергичным проверкам, чем когда-либо прежде, и теперь можно утверждать, что она прошла испытания при самой высокой оценке. Эти наблюдения велись за двойным пульсаром, открытым Джозефом Тейлором и Расселом Хальсом из Принстонского университета, работавшим на радиотелескопе в Аресибо (рис. 9.2). Исследования этого двойного пульсара и выводы, которые они сделали, позволили им в 1993 году получить Нобелевскую премию.

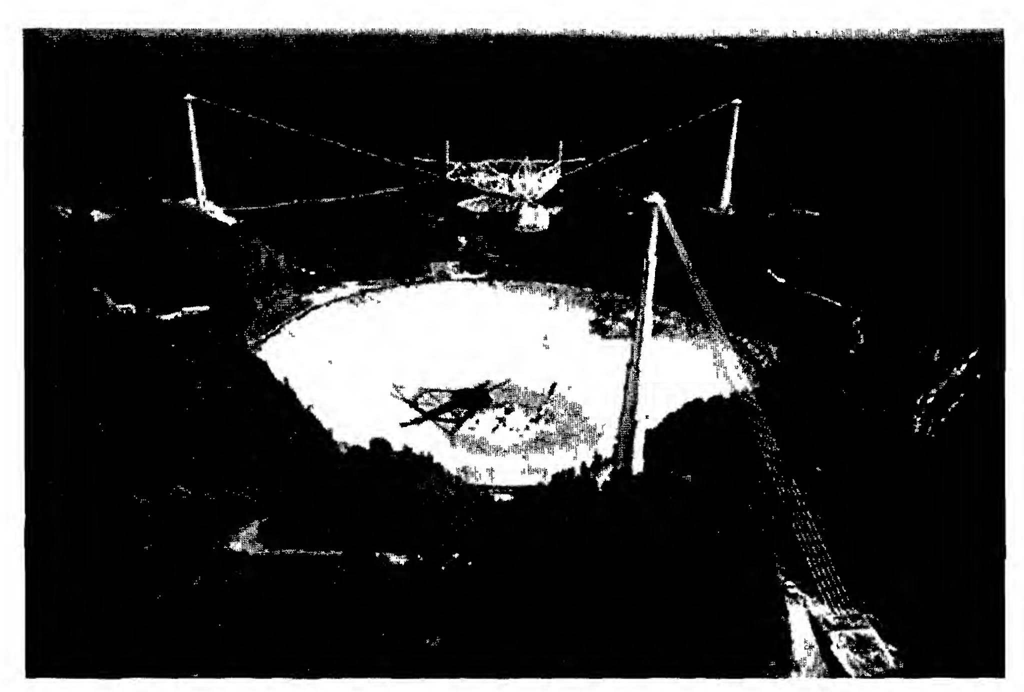


Рис. 9.2. Радиотелескоп в Аресибо, построенный в кратере, образовавшемся от удара громадного метеора. Это самый большой телескоп с одной параболической антенной в мире. (Фотография Дэвида Паркера. С разрешения обсерватории NAIC-Arecibo, установка NSF.)

Как уже говорилось ранее, существует много двойных звезд, то есть когда две звезды кружатся одна вокруг другой. В некоторых случаях плоскость вращения этих звезд бывает близкой к нашей линии прямой видимости, и тогда звезды регулярно закрывают друг друга. Более привычно идентифицировать двойную звезду по регулярным периодическим сдвигам в спектральных линиях одной из них, при этом сдвиги вызываются эффектом Доплера по мере того, как звезда совершает свое орбитальное движение в данный момент к нам, а затем от нас (рис. 9.3).



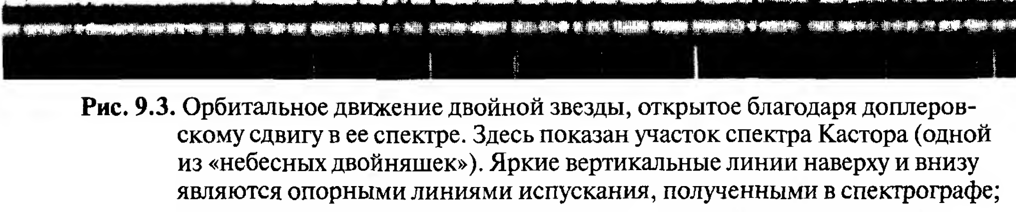


Рис. 9.3. Орбитальное движение двойной звезды, открытое благодаря доплеровскому сдвигу в ее спектре. Здесь показан участок спектра Кастора (одной из «небесных двойняшек»). Яркие вертикальные линии наверху и внизу являются опорными линиями испускания, полученными в спектрографе; два средних ярких спектра, пересеченных темными, вертикальными линиями поглощения, являются спектрами звезды по двум датам. Смещения этих линий, сначала к красному, а затем к голубому, показывают, что звезда удаляется, а потом приближается, потому что она совершает орбитальное движение вокруг другой звезды. (Наблюдения произведены в обсерватории Лика, на горе Гамильтон, Калифорния.)

Когда звезда израсходует все свое термоядерное топливо, она обрушивается под тяжестью своего собственного веса; если она не очень массивная, она становится белым карликом, такой же маленькой, как планета, светящаяся тусклым янтарным светом. Коллапс более массивной звезды будет продолжаться дальше, пока она не превратится в нейтронную звезду — крошечный шарик всего в несколько километров в диаметре, в который будет сжата вся масса звезды. Отдельная нейтронная звезда почти недоступна для обнаружения, если бы во многих случаях на ее поверхности не было «горячего пятна», из которого исходит радиация. А так как звезда быстро вращается вокруг своей оси, этот радиационный луч регулярно пробегает по небу, подобно лучу света от маяка (рис. 9.4). В таких благоприятных случаях нейтронная звезда обнаруживается благодаря поразительной регулярности, с которой наблюдаются импульсы радиации; звезда воспринимается как пульсар. Отличительной чертой пульсара PSR 1913+16, открытого Тейлором и Хальсом, является то, что у него есть компаньон — еще одна нейтронная звезда — и обе они кружат вокруг друг друга, как это делают двойные звезды, находясь в близком соседстве. Эта система является почти идеальной испытательной площадкой для общей теории относительности. Хальс, Тейлор и их сотрудники изучали ее почти двадцать лет, в течение которых постепенные изменения, измеряемые ими, подтверждали теорию Эйнштейна со все более увеличивающейся точностью.

Первая особенность пульсара присутствует в целом у всех пульсаров; это поразительно точные «часы» — такие же точные, как самые лучшие атомные часы, которые мы можем сделать. «Тиканье» этих часов обеспечивается регулярными радиационными импульсами, которые мы считываем во время стремительного кручения пульсара, приводящего «горячее пятно» в поле зрения один раз при каждом обороте. Для двойного пульсара это случается каждые 59 миллисекунд с регулярностью до $1/10^{14}$! Конечно, он постепенно замедляется, но все равно размеренно, что хорошо поддавалось измерению, — но только со скоростью 1 секунда за 100 миллионов лет. Размеренность «тиканья» модулируется эффектом Доплера при вращении пульсара вокруг свое-

го компаньона, и из этой модуляции Тейлор и его коллеги получили с точностью более 1/1 000 000 параметры, которые характеризуют его кеплеровскую орбиту. В частности, они смогли наблюдать прецессию его периастрия (аналог для звезды перигелия планеты), который из-за того, что «год» двойника (время полного оборота вокруг орбиты) равен всего 7,75 часам (!) и из-за близости звезд друг к другу (их разнос кратен радиусу нашего Солнца в диапазоне между 1,1 и 4,8 раза), означает, что они испытывают очень сильное влияние гравитационных полей, причем скорость прецессии превышает почти в 30 000 раз скорость прецессии Меркурия.

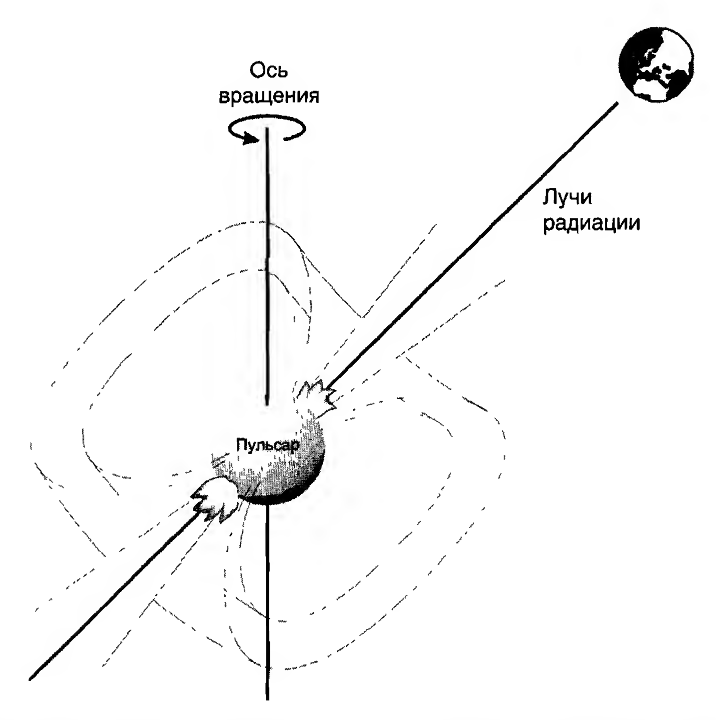


Рис. 9.4. Небесный маяк. «Горячее пятно» на поверхности вращающейся нейтронной звезды излучает радиацию, которую мы считываем с регулярных импульсов. Такие звезды называются пульсарами. На рисунке видно, как это происходит. Как Земля вращается вокруг своей оси, так же делает и пульсар. И если у Земли есть магнитное поле, причем магнитная ось выровнена под углом к оси вращения, то же самое есть у этой звезды. Магнитными полюсами звезды являются «горячие пятна», от которых исходит интенсивное излучение. Так как звезда вращается, лучи радиации разворачиваются кругами, как луч света от маяка. Каждый раз, когда звезда делает полный оборот, луч приходит к нам и мы считываем импульсы радиации

Гравитационный сдвиг к красному спектру и временная задержка Шапиро также были измерены, и опять точно соответствуют прогнозам общей теории относительности. Но это еще не все. Так же, как ускоренный электрический заряд генерирует электромагнитное излучение, так и общая теория относи-

тельности предсказывает, что массы в движении могут генерировать *гравитационное излучение.* В результате двойной пульсар должен терять энергию по мере излучения гравитационных волн, и следовательно, его орбита будет медленно меняться. Такое медленное изменение было отмечено на самом деле, точно так, как было предсказано, и оно является первым прямым подтверждением существования гравитационного излучения.

Как мы видели, гравитационное взаимодействие многократно слабее, чем, например, электромагнитное взаимодействие, что создает огромные трудности для считывания гравитационной радиации (для сравнения: для обнаружения электромагнитного излучения нам нужен только радиоприемник или наши собственные глаза). Вы можете быть удивлены, узнав, что гравитационные взаимодействия настолько слабее электромагнитных. Все-таки мы намного больше знаем о силе тяготения — хотя бы по нашему весу, — чем об электромагнитных силах. Но гравитационные силы всегда притягивают, и наш вес является результатом тянущего усилия всей земной материи; заряды электромагнитной силы могут быть положительными или отрицательными, и следовательно, могут взаимно исключать друг друга. А из-за принципа равносильности все компоненты детектора гравитационной волны также будут испытывать воздействие равномерного гравитационного поля; детектор может обнаружить только «эффекты прилива», создаваемые гравитационным полем, колебания которого считывает аппарат.

При обнаружении электромагнитного излучения первым его следствием будет колебание электрических зарядов; также и гравитационное излучение, по всей видимости, заставит колебаться массы, что позволит обнаружить его с помощью детектора. Следовательно, технические характеристики детектора должны быть такими, чтобы обеспечить считывание этого колебания, которое из-за слабости взаимодействия может быть едва заметным. Слабые движения зеркала можно наблюдать с помощью интерферометра, поэтому зеркало внутри интерферометра было предложено в качестве центрального механизма детектора гравитационного излучения. В интерферометре луч света расщепляется на две составляющие таким образом, что они вибрируют в соответствии друг с другом; они могут затем следовать разными путями перед тем, как снова сойтись вместе, усиливая или взаимоисключая друг друга и производя при этом светлые или темные интерференционные полосы (рис. 9.5). Чтобы усилить этот эффект, компоненты расщепленного луча света заставляют подскакивать много раз между зеркалами, которые колеблются в ответ на гравитационное излучение, что приводит к изменению положения полос. Эта техника была в огромной степени усовершенствована благодаря разработке (сначала для военных целей) зеркал с высоким коэффициентом отражения.

Конечно, кроме гравитационных волн, есть много других явлений, которые могут вызвать колебание зеркал: звуковые вибрации, тепловое движение, дрожание земли, не говоря о многих других. Максимальное устранение побочных воздействий и усиление искомых эффектов требует больших интеллектуальных и экономических затрат. Чтобы устранить другие источники помех, которые могут имитировать сигнал гравитационной волны, был разработан проект

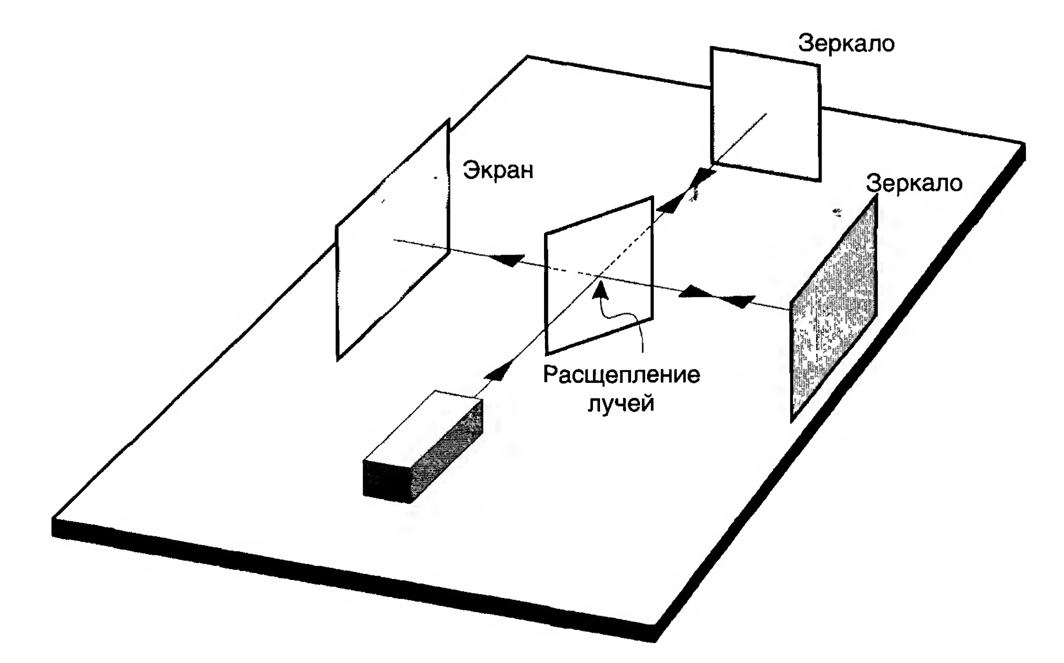


Рис. 9.5. Волны, проходя разными путями через интерферометр, поступают в детектор с разными фазами, а это приводит к чередованию светлых и темных полос. Если разница в траекториях лучей изменяется, происходит смещение полос. В изображённом здесь варианте интерферометра Майклсона луч света направляется к наполовину посеребренному зеркалу, которое выполняет функцию расщепителя луча; одна часть света, попавшего на расщепитель, отражается, а другая проходит сквозь него; пропущенный и отраженный лучи наводятся на зеркала, которые отражают их назад к расщепителю, в котором они вновь объединяются и направляются к экрану, на котором можно наблюдать интерференционные полосы

поиска совпадающих показателей в детекторах международной сети из трех интерферометров, каждый из которых имеет километровую шкалу. Этот проект включает LIGO (Обсерватория с лазерным интерферометром гравитационной волны), который строится на двух площадках в США, Хенфорд, штат Вашингтон, и Ливингстон, штат Луизиана (рис. 9.6), и VIRGO (это не сокращение, а название созвездия (Дева), которое содержит возможный источник гравитационных волн), который строится в Пизе, Италия. Также существует программа британо-германского сотрудничества (GEO 60), согласно которой предполагается построить усовершенствованный вариант такого детектора близ Ганновера, который также будет частью этой международной сети. Хотя астрофизические явления катастрофического характера, способные вызвать поддающееся обнаружению гравитационное излучение, являются редкими, успех детекторов-прототипов, которые уже построены, обнадеживают ожидания, что запланированная детекторная сеть будет достаточно чувствительной, чтобы записать информацию в начале нового тысячелетия. Еще более амбициозный проект LISA (Космическая антенна лазерного интерферометра) планирует запустить три космических аппарата на околосолнечную ор-

биту, которые займут место на вершинах равностороннего треугольника со сторонами длиной 5 млн км каждая (рис. 9.7) — это будет интерферометр такой же, как LIGO, но только в один миллион раз больше. Запуск пока запланирован на 2010 год или раньше. Так же, как радиоастрономия открыла новое окно во Вселенную, то же самое будут делать гравитационные обсерватории. Мы можем надеяться в этом веке на открытия, которые значительно расширят наши знания о космосе.

Есть еще один прогноз в общей теории относительности, который возбудил всеобщее любопытство. Он занимает центральное положение в текущих исследованиях и наверняка сохранит его в новом тысячелетии. Если достаточное количество материи (или энергии) сжать в небольшой объем, ее гравитацион-

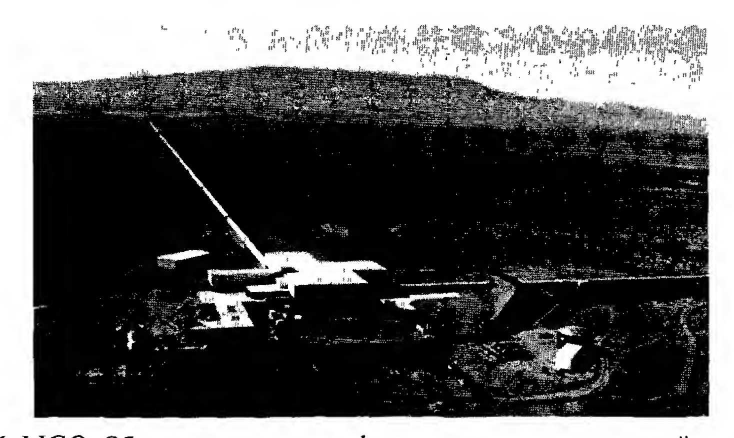


Рис. 9.6. LIGO, Обсерватория с интерферометром гравитационной волны. Эта установка включает гигантский интерферометр в Хенсфорде, штат Вашингтон. Такой же интерферометр установлен в Ливингстоне, штат Луизиана. (С разрешения Лаборатории LIGO.)

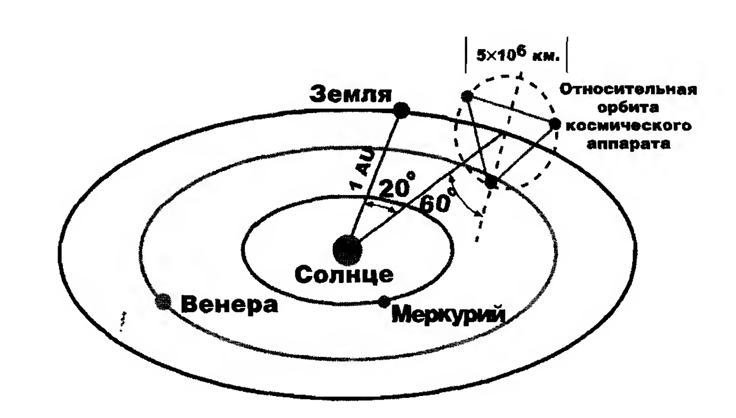


Рис. 9.7. LISA, космическая антенна лазерного интерферометра. Предполагаемое развёртывание трех спутников в виде треугольного интерферометра с длиной каждой стороны 5 млн км. (Схема предоставлена Лабораторией Джет Пропалшн, Калифорнийский технологический институт, Пасадена, штат Калифорния.)

ная сила будет такой большой, что даже свет не сможет избежать ее притяжения; эта материя становится *черной дырой*. Материя и свет, попадая в нее, будут поглощены, и ничто не сможет избавиться от ее тяготения, и ничто не сможет из нее выбраться. (Скажем, почти ничто. Считается, что существуют квантовые эффекты, которые модифицируют это предсказание классической теории относительности Эйнштейна.) Еще Лаплас размышлял о том, что что-то в этом роде вполне может быть. Он знал, что для избежания земного тяготения, например при запуске ракеты в космическое пространство, требуется скорость запуска более 11,2 км/сек. Эта скорость выхода из зоны притяжения зависит от отношения массы Земли к ее радиусу; если бы масса была больше или радиус меньше, она была бы больше. При достаточно большой массе или при небольшом радиусе скорость выхода из притяжения становится такой же, как скорость света, и следовательно, доказывал Лаплас, свет не смог бы оторваться от такого тела. Хотя предпосылки Лапласа шли от теории Ньютона, заключение, к которому он пришел, по сути своей совпадает с общей теорией относительности. Следовательно, если звезда обрушивается настолько катастрофически, что не останавливается на стадии белого карлика или даже нейтронной звезды, тогда, вероятно, ничто не может предотвратить ее дальнейший коллапс, пока вся масса звезды не сконцентрируется внутри такого маленького объема, что она становится черной дырой. Фактически черную дыру окружает поверхность, в которую может упасть материя или свет, но из которой уже ничего не выходит. Что происходит на другой стороне этого «событийного горизонта», навсегда скрыто от взора всех внешних наблюдателей; и всякий, кто сбился с пути или собрался пересечь этот горизонт, будет разорван на клочки гравитационными приливными силами, поскольку возрастающее и фатальное притяжение к центру будет тянуть сильнее одну часть его тела, чем другую.

Несмотря на то что мы не можем видеть черные дыры непосредственно, об их существовании можно судить по гравитационному воздействию, которое они оказывают на материю снаружи, и особенно на материю, кружащуюся вокруг черной дыры, в которую она падает, как вода, стекающая в сливное отверстие (цветная иллюстрация 17). Излучение от таких дисковых ускорителей было явным, и из полученной информации, наряду с предположениями о том, что диск является частью двойной системы — что у него есть, так сказать, темный двойник — мы можем заключить, что некоторые источники рентгеновского излучения на небе действительно связаны с черными дырами. Есть также веские причины верить в то, что черная дыра, с массой, равной массе миллионов звезд, существует в центре некоторых галактик — возможно, большей части галактик, возможно, также нашей собственной галактики. Центр нашей галактики, Млечный Путь, закрыт для прямого астрономического наблюдения облаками пыли. Наш арсенал новых технических средств помог проникнуть сквозь эти облака и обнаружить, что в центре этой темноты действительно находится черная дыра. Также был обнаружен радиоисточник, названный Стрелец А* (Sagittarius A*), с рентгеновским излучением; тщательный анализ показал, что источником этого излучения является сверхмассивная черная дыра, в 2,6 раза мощнее Солнца, находящаяся в центре нашей галактики.

ГЛАВА 10

СТРУНЫ

Теория всего?

Двадцатый век был свидетелем глубоких изменений в том, как физики понимают материю. «Искусственные, гипотетические атомы и молекулы», о которых критически отзывался Мах, доказали свою реальность, так же, как звезды и галактики. Мы их не выдумали. Мы можем получать их изображение и исследовать их реакции. Их разложили на части и анатомизировали, обнаружив в них симметрию и простоту стандартной модели. Наши понятия пространства и времени также подверглись радикальной метаморфозе, став «геометродинамикой» общей теории относительности. Квантовая механика заменила несомненные факты классической механики стержневой системой, которую мы с удовольствием используем, несмотря на то, что никто из нас до конца ее не понимает. Бесчисленные вопросы остаются открытыми. Например, мы по-прежнему ищем новые материалы для электроники и других технологий. Более абстрактные проблемы, при кажущейся отстраненности от текущих прикладных задач, также требуют срочного решения, привлекая внимание некоторых физиков и вызывая удивление простой публики. На пересечении самых последних революционных идей в физике, не только упомянутых ранее, но также возникающих из космологии и желания найти исчерпывающее, но по сути простое теоретическое обоснование, возникла теория, которая находится еще в состоянии брожения, пока новый век вступает в свои права. Ей было дано название «всеобщей теории», но не ее авторами или теми, кто непосредственно участвует в ее разработке. Она называется теорией струн.

Элементарные частицы стандартной модели по-прежнему воспринимаются, по существу, как материальные объекты, даже тогда, когда в них видят кванты полей[1]. Истории, которые фигурируют в картине Файнмана, представляют их распространяющимися в пространстве-времени и вычерчивающими линии, которые пересекаются в точках взаимодействия полей. На самом деле эта локальность взаимодействий является одним из главных строительных блоков для создания совместимых релятивистских теорий поля, от которых зависит стандартная модель. Нет ничего похожего на действие на расстоянии. Общая теория относительности стоит в стороне от стандартной модели, включая силы гравитации, которые отсутствуют в этой модели, но которые должны быть включены в любую предполагаемую сферу действия ««всеобщей теории». Общая теория относительности, как и классическая теория, является теорией поля при некотором сходстве с электродинамикой Максвелла; переменные параметры поля являются величинами,

которые характеризуют геометрию пространства-времени и которые сами имеют динамические свойства — отсюда термин «геометродинамика», изобретенный Джоном Уилером. Уилер дал краткую характеристику общей теории относительности: «Пространство-время диктует материи, как двигаться. Материя диктует пространству-времени, как искривляться». Но прежде чем была разработана теория струн, никто так и не смог предложить какого-либо приемлемого решения проблемы обеспечения совместимости общей теории относительности с квантовой механикой.

Теория струн основана на представлении, что элементарные объекты являются скорее растягивающимися струнообразными сущностями, чем материальными частицами из более старых теорий. Так же, как материальная частица вычерчивает траекторию своего движения в пространстве, свою мировую линию, так и струна производит развертку поверхности, своей мировой страницы. Динамику релятивистской частицы в свободном падении можно описать при условии, что траектория ее движения была экстремальной (минимальной или максимальной) в длину. По аналогии с этим динамика струны основана на той предпосылке, что площадь обработанной поверхности является экстремальной. Конечно, кроме этого, здесь есть еще много чего другого; квантовые поля, которые имеют определенное влияние в космическом пространстве, также относятся к динамичным системам. Оказывается, математика предъявляет очень строгие требования, которые, в сущности, определяют эту теорию практически как уникальную. Замечательным следствием является то, что, отталкиваясь от этой довольно общей исходной точки, можно получить последовательную квантовую теорию, связанную с другими полями, которую до сих пор никак не удавалось сформулировать. Эта квантовая гравитация демонстрирует многое из того, что известно из стандартной модели физики высоких энергий. Кроме того, эта теория имеет объемное математическое содержание, которое может быть использовано в чистой математике, особенно в геометрии и топологии.

Теория струн первоначально разрабатывалась не для получения согласованной квантовой теории гравитации; вначале она задумывалась скорее как феноменологическая модель для иллюстрации некоторых свойств мю-мезонов, полученных благодаря наблюдению за тем, как кварки связаны друг с другом. Основанием послужила идея, сходная с идеей Фарадея, который воображал «силовые линии», тянущие друг к другу частицы с противоположными электрическими зарядами. Поэтому предположим, что на самом деле кварки внутри мю-мезонов связаны своего рода эластичной натянутой струной, и затем вычислим характеристики, необходимые для того, чтобы сделать такую модель совместимой со специальной теорией относительности и с квантовой механикой. Эта модель обладает очень хорошими качествами: в частности, она предсказывает существование семейств мю-мезонов с массами, соотнесенными с их спином; то же самое было обнаружено с помощью экспериментов. Натяжение струны, которая определяет характерную шкалу массы, является фактически единственной регулируемой постоянной величиной в этой модели, и для того чтобы достигнуть соответствия с на-

блюдаемыми массами мю-мезонов, она должна была быть близкой к массе протона, что совершенно обоснованно для теории сильных взаимодействий. В то же время, новая теория также предсказала состояние с нулевой массой и спином-2, а такого состояния мю-мезона не существует. Но в физике возможно существование частицы с нулевой массой и спином-2. Гравитация, квант гравитационного поля в любой квантовой теории поля, была бы как раз такой частицей; у нее была бы нулевая масса, потому что гравитационные волны общей теории относительности, как и электромагнитные волны, распространяются со скоростью света и спин-2, потому что это то, что требует от нее теория тензора. Возможна ли ситуация, когда модель не годится для теории мю-мезонов, но указывает, как формулировать квантовую теорию гравитации? Эта особенность объясняет огромный рост интереса к теории струн, начиная с 1980-х годов.

Прежде чем теория струн смогла стать основой для квантовой теории гравитации, необходимо было убрать с ее пути ряд препятствий. Одним из них стала шкала массы, которая не могла больше служить физике адронов, быть шкалой массы мю-мезонов и протонов. Вместо нее должна быть шкала, установленная по гравитационной постоянной Ньютона, которая вместе со скоростью света и постоянной Планка определяет уникальные значения шкал массы, длины и времени. Этими значениями являются так называемая масса Планка (приблизительно 10^{19} раз от массы протона), длина Планка (около 2×10^{-35} метров) и время Планка (около 5×10^{-44} сек). Они очень далеки от шкалы явлений в любом эксперименте, который мы можем придумать, но они устанавливают шкалу, в которую должны быть включены гравитационные влияния при рассмотрении квантовых явлений. И они также характеризуют космический режим, установившийся непосредственно после большого взрыва.

Еще одним препятствием, досаждавшим струнной модели, даже когда ее использовали для описания мю-мезонов, было то, что теория струн приобретает смысл только тогда, когда пространство-время имеет больше четырех измерений! В особых случаях для теории, имеющей дело только с бозонами, требуется 26 измерений, а для другой, включающей также фермионы, достаточно 10 измерений. Трудно допустить больше четырех измерений в теории, у которой шкала длины характеризуется сильными взаимодействиями, но для теории гравитации это предложение не кажется слишком нереальным. Еще в 1920-х годах Теодор Калуза и Оскар Кляйн предположили, что существует дополнительное, пятое измерение, которое каким-то образом ограничено очень небольшой шкалой, свернутой наподобие маленького круга, а не вытянутой, как другие четыре, в бесконечность. Идея Калуза-Кляйна содержала намек на унификацию электродинамики и общей теории относительности — мечту, к воплощению которой Эйнштейн постоянно стремился в последние годы своей жизни. Возможно, мир действительно имеет десять измерений, из которых только четыре были «сжаты» в крошечную шкалу длины Планка. Но даже при этом допущении теория струн не могла существовать без проблем.

Теория, в том положении, в котором она находилась, не смогла избежать предположения о том, что существуют частицы, которые путешествуют быс-

трее, чем свет, — они называются *тахионы* (от греческого слова, означающего «стремительный») — а такая гипотеза означала столкновение с таким числом трудностей, которые теория не смогла бы преодолеть. Спасло теорию струн введение понятия *сверхсимметрии*. Как математическая симметрия, связывающая бозоны с фермионами, это понятие было впервые предложено в 1971 году Юрием Голфандом и Евгением Лихтманом. (Голфанд очень скоро стал «отказником», получив отказ на свое заявление эмигрировать в Израиль с последующим наказанием со стороны советских властей.) Вскоре последовала теория сверхгравитации, в которой симметрии пространства-времени были расширены так, как предлагалось этой сверхсимметрией, а также появились сверхсимметричные модели физики частиц, предсказывая бозонов-партнеров для известных фермионов (скварки как партнеры кварков и т. д.) и фермионы-партнеры для бозонов (например, глюионы и фотионы как партнеры глюонов и фотонов соответственно.) Эти экзотические напарники еще (пока!) не открыты, но их усиленно ищут в многочисленных текущих экспериментах. И притом что мы наблюдаем в уже исследованных энергиях, кажется, что такие частицы действительно играют свою роль в процессах с участием высоких энергий.

Превращение теории струн в теорию суперструн устранило тахионы, но предстояло преодолеть еще одно препятствие: аномалии, которые возникают при переводе этой теории в квантовую теорию. Мы уже обсуждали решающую роль калибровочных симметрий при удалении бесконечностей из теории поля путем придания этой теории способности к перенормировке. Эмми Нетер, выдающийся математик XX века, разработала знаменитую теорему, которая связывает существование калибровочной симметрии с током, который сохраняется. (Нетер, несмотря на предубеждение против женщин в европейских университетах, была принята на факультет в Геттингене, но потеряла свою работу там в 1933 году под давлением нацистов. Она бежала в США, где преподавала в Брин Мор и в Институте повышения квалификации в Принстоне.) Привычный электрический ток представляет пример сохранения тока: хотя электрический заряд может передвигаться с места на место — а ток это нечто иное, как поток зарядов; — общий электрический заряд в изолированной системе никогда не меняется. Теорема Нетер придерживается классической теории поля. Но иногда в соответствующей квантовой теории поля, несмотря на присутствие калибровочной симметрии, ток Нетер не сохраняется. В этом случае аномалия отсутствует. И хотя мы говорим о теории струн, а не о квантовой теории поля, с точки зрения *мировой страницы* теория струн *является* квантовой теорией поля, причем поля живут в однопространственной, одновременной, имеющей измерения поверхности, которая является мировой страницей. Эта теория 1+1-размерного поля должна быть свободна от аномалий, чтобы теория струн была непротиворечивой.

В своей замечательной работе Майкл Грин и Джон Шварц показали, что эти аномалии устраняются, когда струна получает дополнительные симметрии — сверхсимметрии — причем таким способом, который для обеспечения непротиворечивости является почти уникальным. Вот так был отправлен в

путь «струнный состав», который до сих пор продолжает свое непрерывное движение. Из работы Грина и Шварца и тех, кто продолжил их дело, следовало, что существует пять последовательных свободных от аномалий теорий суперрхструн. И как оказалось, любая такая теория будет обязательно содержать теорию гравитации, которая при низких энергиях (здесь значение «низкая» энергия относится к диапазону энергий, до тысячи миллиардов раз превышающую энергию, достигаемую в существующих и проектируемых ускорителях частиц) идентична общей теории относительности Эйнштейна. Иначе говоря, только на расстояниях в миллион миллиардов меньших размера атомного ядра будут очевидными «струнные» отклонения от общей теории относительности Эйнштейна. Следовательно, теория струн, можно сказать, предсказывает теорию гравитации Эйнштейна. Возможно, вы предпочли бы сказать не «предсказывает», а говорить о прошлом, но помните, что теория струн была разработана для подтверждения общей теории относительности. И это лишь небольшая часть того, что она в действительности представляет собой.

Подумайте сначала о струнном контуре, движущемся сквозь пространство (рис. 10.1) Его мировая поверхность представляет собой нечто вроде трубки, проходящей сквозь пространство-время.

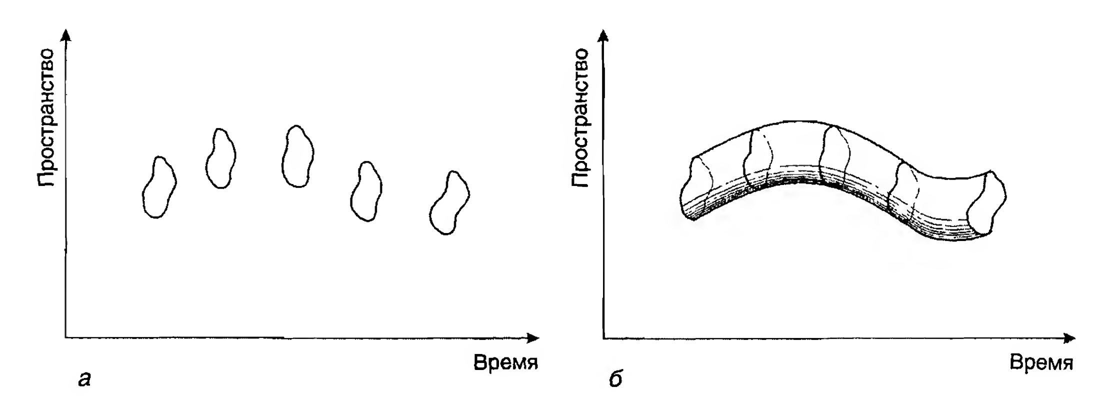


Рис. 10.1. Мировая трубка струны: *а* — «стробоскопический» вид струны в последовательном движении; *б* — картина «течения времени» той же самой струны, показывающей след мировой трубки в пространстве-времени

Характерная шкала длины, связанная с натяжением струны, — единственным свободным параметром теории, — является длиной Планка. Она такая крошечная, что даже на шкале физики частиц трубка такая узкая, что напоминает линию, похожую на вселенскую линию элементарной частицы. Но есть поля, которые «встроены» в струны Вселенной, и сама струна может вибрировать как натянутый резиновый жгут, с нескончаемой последовательностью различных режимов вибрации при еще более высоких частотах. У каждого из разных режимов вибрации есть своя характерная энергия и свое характерное поведение — как у разных видов частиц, а это значит, что один

контур струны может иметь свойства многих разных видов частиц в зависимости от ее внутренних вибраций. Следовательно, вселенская линия, которую напоминает эта узкая трубка при прохождении сквозь пространство, может быть линией любой из многих разных и возможных частиц. Удивительно, что среди этих возможностей мы найдем не только гравитацию нулевой массы, со всеми свойствами, необходимыми для соответствия общей теории относительности Эйнштейна, но также все элементарные частицы стандартной модели. У теории сверхструн есть еще много других положительных свойств.

Общая теория относительности, когда ее воспринимают как «обычную» квантовую теорию поля, имеет характеристики всех бесконечностей, не способствующих перенормировке теории, потому что кванты в таких теориях являются, по сути, точечными возбуждениями поля и их взаимодействия локализованы как изолированные события в пространстве-времени. Эта локализация взаимодействий является неотъемлемой составляющей релятивистской квантовой теории поля, но она также является источником бесконечностей, которые «мешают» этим теориям, пока их не сможет «нейтрализовать» перенормировка. А для общей теории относительности теории гравитации Эйнштейна, это оказывается невозможным. Но струнная теория гравитации не является квантовой теорией поля обычного типа; трубка, вычерчиваемая струной в пространстве-времени, напоминает линию только в том случае, когда ее диаметр так мал, что не имеет значения. Но хотя есть особая точка, в которой вселенская линия разделяется на две части, как в букве *Y*, если ветви этой *Y* были действительно трубками, такая особая точка отсутствует. Из этого следует, что аналогии теории струн с диаграммами Файнмана не содержат никаких особых точек, которые в теории поля приводят к бесконечностям. Следовательно, квантовая теория гравитации, возникающая из теории струн, свободна от бесконечностей; теория струн ведет к последовательной квантовой теории гравитации — факт, который физики не могли установить на протяжении не менее полувека. Чтобы увидеть, как это происходит, нужно сжать трубку так, чтобы она напоминала линию, и тогда становится ясно, что теорию Эйнштейна нужно изменить, но в очень точно определенном направлении. Поправки, вводимые этими изменениями, являются совершенно ничтожными, если речь идет о наблюдаемых гравитационных явлениях, потому что они являются квантовыми эффектами, которые слишком малы, чтобы иметь какое-либо значение для явлений такого большого масштаба.

Следовательно, теория суперструн обещает объединить стандартную модель с квантовой теорией гравитации без этих «неудобных» бесконечностей и без произвольных констант, которые нужно регулировать, как только выбрано направление натяжения струны. Я должен был сказать «обещает», потому что предстоит очень многое сделать, прежде чем можно будет гарантировать эти результаты. Во-первых, как уже было сказано, совместимость требует, чтобы пространство-время, в котором движется струна, должно иметь десять измерений, поскольку мы настаиваем, конечно, на сверхструне, которая имеет как фермионовые, так и бозоновые возбуждения. Так почему же мы думаем, что у нас есть только четыре измерения — три пространственных и

одно временное? Скорее всего, это происходит из-за метода, первоначально предложенного в 1919 году Калузой в письме к Эйнштейну, а позднее усовершенствованного Кляйном. Шесть из первоначальных 10 измерений становятся «спонтанно сжатыми», что означает, что вместо бесконечного продления, подобно прямой линии, эти сжатые измерения, причем каждое из них, больше похожи на крошечный кружок с окружностью порядка длины Планка. Они такие крошечные, что мы не подозреваем о них, — но не об их последствиях. Оказывается, что это сжатие может произойти разными способами, поэтому то, что изначально являло собой строго ограниченный набор вероятностей — только пять согласованных теорий сверхструн — теперь, видимо, еще раз стало средоточием огромного диапазона выбора. Теоретики склонны считать, что убедительная фундаментальная теория не должна быть настолько произвольной, чтобы предлагать такой богатый выбор, ведь здесь так много возможностей для уловок, чтобы согласовать теорию с фактами. Этот предрассудок имеет, в сущности, эстетический характер, но его поддерживают история успеха стандартной модели и весь путь развития физики частиц высоких энергий и теории квантового поля, на которых базируется эта модель. Стандартная модель предоставляет мало возможностей для уловок!

Совсем недавно, во время так называемой второй революции струн, открылся совершенно новый путь для будущего исследования, на котором уже просматриваются намеки на метод, с помощью которого может быть восстановлена «жесткость» теории[2]. Было установлено, что теории суперструн обладают дополнительными симметриями, называемыми симметриями *двойственности*. Простой вид симметрии двойственности мы находим в электродинамике Максвелла, к тому же ее давно исследовал Дирак; то есть основные уравнения остаются неизменными, если электрические и магнитные поля являются взаимозаменяемыми. Двойственность можно рассматривать как нечто близкое симметрии в некоторых гравюрах М.С. Эшера (рис. 10.2).

В теории струн мы находим двойственность, похожую на двойственность в теории Максвелла, а также двойственность другого вида, в которой, например, решение уравнений с измерением, сжатым до маленького кружка, по сути, эквивалентно решению уравнений с большим радиусом[3]. Другие двойственности и «зеркальные симметрии» связывают решения уравнений, выведенных из одной из пяти согласованных теорий суперструн, сжатой неким способом, с решениями из еще одной теории, сжатой другим способом. Предполагается, с большой долей уверенности, что все пять теорий суперструн и разные способы их сжатия связаны одна с другой и являются просто разными реализациями еще более фундаментальной теории, которую один из ее основателей и главный защитник Эд Уиттен назвал М-теорией. Он говорил: «“М” означает “волшебная” (Magic), “тайна” (Mystery) или “мембрана” — на выбор». Другие предположили, что, «М» взята от слова «Мать». *М-теория живет в одиннадцати измерениях*, а не в десяти. Мы не знаем, как сформулировать эту туманно воспринимаемую теорию, кроме того, только, что в разных крайних значениях она уступает место ранее установленным согласованным теориям струн. Я сам верю, что эта идея, которую я назвал од-

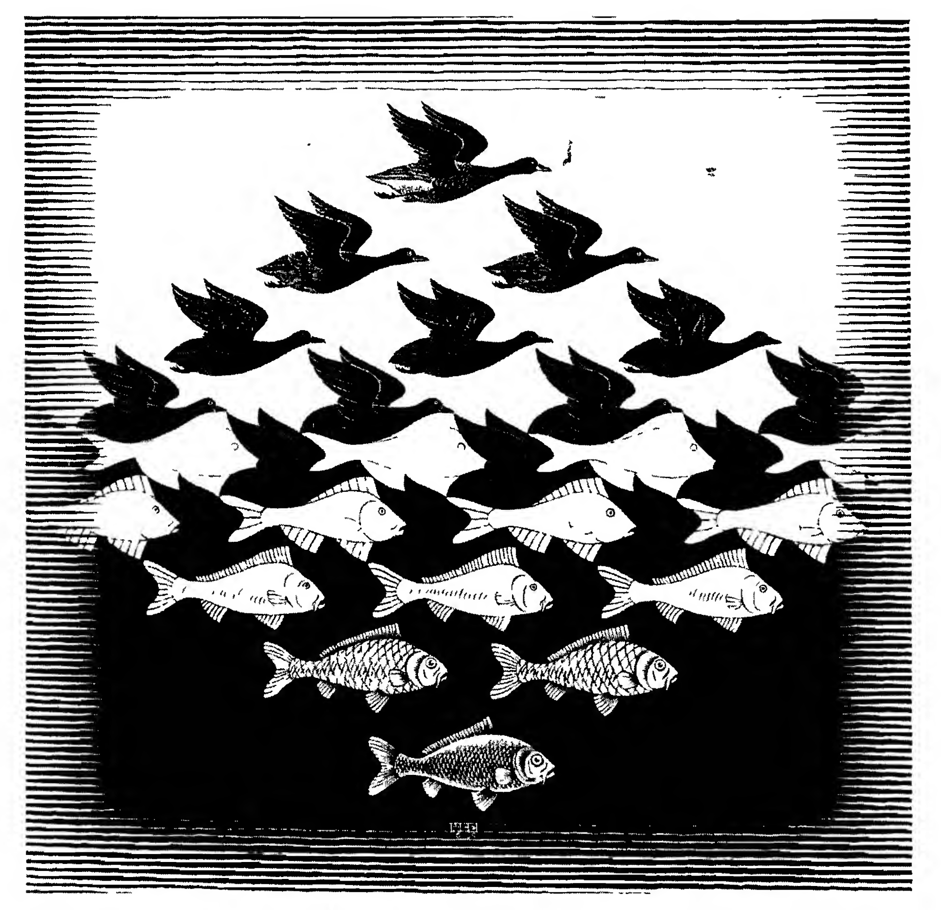


Рис. 10.2. «Небо и вода», М.С. Эшер. Между птицами и рыбами существует некий вид двойственности. (© 2001 Кордон Арт-Баарн-Холланд. Все права сохраняются.)

ной из самых «горячих» тем обсуждения в теории высоких энергий, является не просто чудом, сотворенным за девять дней, но она будет и дальше развиваться, чтобы еще глубже понять структуру пространства, времени и материи.

Такие размышления поддерживают также еще один пласт идей, некоторые из которых связаны с темами, затронутыми в предыдущих главах. Вернемся ненадолго к «обычной» квантовой теории поля, в которой поля соответствуют уравнениям движения, очень похожим на классические уравнения, описывающие знакомые волны, например рябь на поверхности воды в спокойном водоеме. В квантовой теории поля эти волны квантуются, чтобы стать тем, что мы можем назвать элементарными возбуждениями поля, и идентифицируются с частицами, связанными с полем (например, с фотонами электромагнитного поля). Так как поля взаимодействуют, эти возбуждения также взаимодействуют, и таким образом частицы рассеиваются, превращаются из одного вида в другой, создаются и разрушаются. Иначе говоря, в результате взаимодействия уравнения движения перестают быть линей-

ными. Происходит также то, что волны разной частоты, подобно частицам с разными энергиями, путешествуют с разными скоростями, и это явление называется *дисперсией.* Теперь, когда волновое уравнение демонстрирует как нелинейность, так и дисперсию, оно может поддержать совершенно другую форму возбуждения. Историческое открытие этого явления, сделанное Джоном Скотом Расселом в 1834 году, когда он наблюдал за продвижением баржи по каналу Эдинбург-Глазго, было описано так красочно, что его стоит повторить:

Мне случайно пришлось наблюдать движение судна на большой скорости, когда оно внезапно остановилось, и мое внимание привлекло яростное и бурное возмущение мелких волн, образовавшихся вокруг него. Было видно, как разные объемы воды собирались в массу хорошо определяемой формы вокруг центра по длине судна. Эта скопившаяся масса, поднявшись наконец до острого гребня, начала устремляться вперед с солидной скоростью к носу корабля и затем вся прошла перед ним и, сохраняя форму, одиноко покатилась вперед по спокойной поверхности воды — большая, одинокая бегущая волна. Я немедленно покинул судно и попытался следовать за волной пешком, но обнаружив, что она движется слишком быстро, сразу же оседлал лошадь, догнал ее за несколько минут и увидел, как она продолжает свой одинокий путь по водной глади с равномерной скоростью. Проследовав за ней на расстояние более мили, я увидел, что она начала постепенно успокаиваться, пока совсем не потерялась среди изгибов канала.

Другое название для одиночной волны этого вида — *солитон*, а внимание привлекло предположение (например, Тони Скирма), что некоторые из частиц, которые мы наблюдаем, больше похожи на солитоны, чем на элементарные возбуждения поля.

Есть солитоноподобные объекты, которые предстоит найти в теории суперструн, и удивительно, что элементарные возбуждения в одном виде суперструн можно связать с солитоновым возбуждением в другой формулировке этой теории путем преобразования двойственности. Эта взаимозаменяемость солитонов и элементарных возбуждений, получаемая благодаря преобразованию двойственности, позволяет использовать методику теории возмущений для исследования доселе незатрагиваемых аспектов теории с сильными взаимодействиями. У этого есть точная аналогия в статистической механике, в которой соответствующая двойственность связывает свойства при условии высокой температуры со свойствами при низкой температуре.

Также существуют солитоноподобные решения для уравнений общей теории относительности. Одно из них было найдено уже в 1916 году Карлом Шварцчайлдом: это знаменитое решение вопроса о «черной дыре» в уравнениях Эйнштейна, и его значение сразу было оценено в научных кругах. Объект, который оно описывает, имеет сферическую симметрию и не изменяется во времени; решение включает только один параметр, который идентифицируется с его массой. Так как решение верно там, где отсутствует материя, его можно использовать для описания искривления про-

странства-времени вне сферически симметричного, статического тела — и в большинстве случаев мы можем рассматривать солнце в качестве такого тела. Поэтому решение Шварцчайлда было впервые использовано для выяснения последствий общей теории относительности для движения планет и других тел в пределах нашей солнечной системы и имело шумный успех, о котором мы уже говорили. Геометрия Шварцчайлда не имеет применения внутри Солнца, где присутствует материя, но скорее плавно присоединяется к подходящему для этого случая решению, чем к «пустому пространству» вокруг него. И это справедливо, так как у каждой звезды есть критический радиус, соотнесенный с ее массой, и если вся масса сосредоточена в пределах этого радиуса так, что решение продолжает оставаться верным в его критических пределах, мы получаем то, что в действительности является черной дырой. Вы почувствуете облегчение, когда услышите, что Солнцу такая катастрофа не грозит: его критический радиус равен всего 3 км против его истинного радиуса размером около 700 000 км. Следовательно, чтобы солнце стало черной дырой, вся материя, которую оно содержит, должна быть сжата в сферу радиусом 3 км — а это вряд ли случится!

Как мы видели, черная дыра может образоваться в результате обрушения достаточно массивной звезды под тяжестью своего собственного веса, что, по предсказанию должно случиться после того, как она израсходует всю термоядерную энергию, которая ранее поддерживала ее. Полагают, что некоторые астрономические объекты являются как раз такими звездными остатками черной дыры. Другими кандидатами в черные дыры являются ядра квазаров и другие так называемые «активные галактики», так как кроме гравитационной энергии, которая высвобождается целыми звездами, падающими в сверхмассивные черные дыры (с предполагаемой массой в несколько миллионов раз больше массы Солнца), мы не знаем ни одного источника энергии, эквивалентной энергии, излучаемой активными галактиками.

В классической (не квантовой) общей теории относительности только что образовавшаяся черная дыра может только увеличивать свою массу, затягивая в себя материю или излучение окружающих ее объектов. Если бы в нее ничего не попадало, такая черная дыра продолжала бы существовать, увеличивая массу, но в другом отношении оставалась бы фактически неизменной во времени. При наблюдении на расстоянии (безопасном!) об ее присутствии можно судить только по силе тяготения, определяемой ее массой. Однако квантовые эффекты изменяют все это и весьма удивительным способом. В 1972 году Яков Бекенштейн продемонстрировал интригующие аналогии между свойствами черных дыр и законами термодинамики. Два года спустя ситуацию объяснил Стивен Хокинг (рис. 10.1), который открыл, что квантовые эффекты заставляют черные дыры излучать энергию — как черное тело, которое исследовал Планк, — и с температурой, обратно пропорциональной ее массе.

Следовательно, из-за квантовых эффектов изолированная черная дыра будет терять энергию. Но мы знаем, что энергия и масса взаимозаменяемы (снова $E = mc^2$!), поэтому потеря энергии означает потерю массы; черная дыра теряет массу, а так как ее эффективная температура обратно пропорциональ-



Рис. 10.3. Стивен Хокинг, который в настоящее время руководит лукасовской кафедрой в Кембридже, которую когда-то возглавлял Исаак Ньютон. (© Фото Кимберли Батлер.)

на массе, ее температура увеличивается, и поэтому интенсивность излучения растет. Делая такой вывод, Хокинг не смог учесть «обратную реакцию» радиационного излучения на черной дыре, так что никто не знает наверняка, как будет выглядеть заключительный этап процесса квантового излучения, когда оставшаяся энергия будет кратной энергии Планка — то есть около $1{,}8 \times 10^9$ джоулей, что достаточно для того, чтобы лампочка в 60 Вт горела в течение года. Но согласно точному предсказанию в последнюю десятую долю секунды высвободится столько энергии, сколько дает взрыв водородной бомбы. По сообщениям военных, отслеживающих возможные нарушения договора об испытании атомных зарядов, таких страшных взрывов рядом с Землей не наблюдалось. В сущности, это и неудивительно, так как звездная масса черной дыры имеет температуру всего в одну миллионную градуса выше абсолютного нуля и ее потеря радиации Хокинга будет ничтожной по сравнению со скоростью, с которой она поглощает энергию из 2,7 К фоновой космической радиации.

Несмотря на убедительные доказательства существования черных дыр со звездной массой, а также сверхмассивных черных дыр, вероятность черных мини-дыр все еще остается открытой. Они являются единственным спосо-

бом объяснения «недостающей массы» во Вселенной, и некоторым космологам нравится эта идея, потому что она привносит логичность в предпочитаемую ими модель космической эволюции. Черные мини-дыры, возможно, образовались во время большого взрыва, и предположение, что они действительно существуют, — не пустой звук. Но, по моему мнению, они не являются астрономическими объектами.

Классическая общая теория относительности Эйнштейна допускает и другие решения проблемы черных дыр, кроме решения Шварцчайлда. В некоторых из них черная дыра может нести электрический заряд или крутиться как волчок. Поскольку теория струн включает общую теорию относительности, вас не удивит, что у нее тоже есть солитоновые решения для черных дыр с участием массы, заряда и спина. При некоторых особых значениях этих величин оказывается, что эти предсказанные состояния не имеют никакой радиации Хокина, и поэтому даже в квантовом состоянии они остаются устойчивыми. Это служит некоторой опорой для предположения, сделанного Альдусом Саламом и другими, что по меньшей мере некоторые из элементарных частиц являются, фактически черными дырами!

Некоторые решения уравнений М-теории описывают объекты, которые являются одномерными объектами в пространстве-струнах. Есть также решения, которые вместо этого описывают двухмерные поверхности — что-то вроде мембран. И есть также объекты с еще большим числом измерений: они из-за отсутствия более адекватного слова, все называются *браны*. Было сделано предположение, что наш знакомый трехмерный мир может быть на самом деле 3-брановым в более высоких измерениях М-теории. Возможно, что мы сможем узнать о том, что лежит за пределами нашего 3-бранового мира, только с помощью гравитационных эффектов, которые несут следы того, что находится где-то в другом месте. Конечно, все это может быть воспринято как фантастика, не связанная с реальным физическим миром. Но уравнения М-теории действительно имеют такие решения, и нет причин отвергать их.

Двойственность, которая подразумевает, что сворачивание пространственного размера в круг с радиусом R эквивалентно сворачиванию его в круг с радиусом 1/R, предполагает, что на шкале длины Планка наши понятия нуждаются в радикальном пересмотре. Это означает, что расстояние между двумя точками, скажем, в половину длины Планка, является тем же, что расстояние в две длины Планка, — следовательно, нет смысла говорить об интервалах на этой шкале. Иначе говоря, то, что кажется на нашей грубой шкале ровным и невыразительным пространством, становится на таком тонком уровне тем, что Хокинг назвал «пеной пространства-времени»: квантовыми флуктуациями, генерирующими эфемерные черные дыры, которые образуются и преобразуются.

Уравнения общей теории относительности имеют решения, которые описывают своего рода обратного двойника черных дыр — *белые дыры*. Если черные дыры мы представляем себе в виде воронки в пространстве, которая, как торнадо, всасывает в себя материю, то белая дыра будет перевернутой воронкой, из которой материя извергается наружу. Воронка черной дыры

может быть соединена каналом в виде «червоточины» с горловиной белой дыры, и материя, затянутая в черную дыру, может быть затем выброшена из белой дыры. Белая дыра может находится далеко от черной дыры, с которой она соединена! Все это похоже скорее на научную фантастику, чем на научное предсказание, или, как говорят, «Там, где-то за радугой», но такая вероятность по крайней мере не расходится с нашим современным пониманием общей теории относительности и также с тем, что допускает М-теория.

В следующей главе я попытаюсь рассказать о нашем современном понимании космологии, удивительном взаимодействии между общей теорией относительности и физикой частиц, физикой очень больших и физикой очень маленьких величин. Теория суперструн еще не дала ответа на некоторые открытые вопросы (касающиеся скорее деталей, чем принципов) в области космологии большого взрыва, но я уверен, что она ответит. В любом случае я испытываю благоговение перед тем, что существует тесная связь между физикой мельчайших шкал, установленных временем и длиной Планка, и физикой космоса в целом, в которой временная шкала охватывает период порядка 15 млрд лет, а шкала длины вытянута на многие световые годы. Фундаментальные принципы, которые связывают эти две шкалы, разделенные на шестидесятикратную величину, только начали формироваться в конце двадцатого века и обязательно продолжат совершенствовать физику в двадцать первом[4].

ГЛАВА 11

В САМОМ НАЧАЛЕ

Большой взрыв — и после него

Тайна космоса, его происхождение и его судьба вызывали трепет и самые разные предположения с незапамятных времен. Величественное движение звезд по небесному своду внушает благоговение. Однажды в Калифорнии один из студентов факультета астрофизики спросил меня, почему он не может просто лежать на склоне холма, смотреть на звезды и «устанавливать связь между макрокосмосом и микрокосмосом». Он и не знал, насколько он был близок к истине! Потому что для глубокого понимания космологии большого взрыва, реальность которого уже доказана полученной достоверной информацией, мы должны знать что-то о физике частиц и о том, что происходит на уровне, установленном квантовой теорией гравитации, то есть, на шкале Планка, характерная длина которой равна 10^{-35} метров. Но давайте ближе к теме.

В ясный день вы можете чувствовать тепло и видеть свет, излучаемый Солнцем. Хотя мы находимся на расстоянии $1{,}5\times10^{11}$ метров, интенсивность полученной от Солнца энергии равна приблизительно 1,5 кВт на каждый квадратный метр земной поверхности. Этот огромный поток энергии продолжается уже несколько миллиардов лет. Его источником, как у всех звезд, является термоядерная реакция — главным образом, это преобразование водорода в гелий путем синтеза. Ганс Бет (один из патриархов физики, все еще активный в наши дни, в свои девяносто лет), провел масштабные и детальные исследования особенностей этих реакций в 1938 году. Со временем весь водород Солнца будет израсходован, и затем начнут действовать другие реакции, производя кислород и углерод, так как запасы гелия будут истощены. Когда все топливо закончится, старые звезды могут обрушиться и образовать белые карлики либо взорваться как сверхновы. Взрыв сверхновы запускает процесс имплозии: звезда обрушивается под тяжестью собственного веса, сжимая свое ядро, чтобы инициировать в последний, драматичный, момент термоядерное преобразование. Звезды живут очень долго, поэтому взрывы сверхнов случаются редко — только один или два за сто лет в известных нам галактиках. Материя, выброшенная взрывом сверхновы, может под действием силы тяготения смешаться с газовыми облаками, в которых рождается новое поколение звезд. Наша Земля была сформирована из такого же конденсирующегося облака газа, давшего жизнь Солнцу (звезда третьего поколения), поэтому, вместо того чтобы спрашивать, откуда мы появились, мы должны выяснить, откуда появилось Солнце.

Почти все химические элементы во Вселенной, кроме водорода, гелия и лития, образовались в процессе ядерных реакций на звездах и были рассеяны

взрывами сверхнов. Железо, которое окрашивает нашу кровь в красный цвет, состоит из продуктов распада радиоактивного никеля, образовавшегося в сверхнове. Из спектра солнечного света мы знаем, что газ и пыль, которые, уплотняясь, образовали наше Солнце, содержали такие элементы, которые могли быть произведены только при взрыве сверхнов из предыдущего поколения звезд. Менее чем через микросекунду после большого взрыва, когда температура расширяющейся Вселенной уже достаточно снизилась, кварки могли соединиться, чтобы образовать протоны, которые 300 000 лет спустя в комбинации с электронами превратились в водород.

В настоящее время мы удивительно ясно представляем, как после большого взрыва образовалась «обычная» материя. Сведение воедино последствий изменений, вызванных расширением Вселенной, и ее результирующего охлаждения является высшим достижением космологии. Оно основано на нескольких важных наблюдениях и большом количестве физических дисциплин: физике частиц высоких энергий, статистической физике и общей теории относительности. Для начала обратимся к последней. Общая теория относительности Эйнштейна связывает структуру пространства-времени, его геометрию и динамику с присутствием и распределением материи. И как сказал Джон Уилер: «Материя извлекает порядок движения из геометрии». Уравнения Эйнштейна, хотя и трудны для обработки, становятся вполне «послушными» при использовании в космологии. Причина кроется в предположении, что пространство и распределение материи во Вселенной являются однородными, а скопление материи для образования галактик и звезд не имеет отношения к структуре большого масштаба.

В 1922 году Александр Фридман уже доказал, что при таком предположении уравнения Эйнштейна имеют решение, которое соответствует расширяющейся Вселенной. (Это случилось до того, как данные наблюдений Хаббла позволили сделать тот же вывод.) Его статья в журнале «Zeitschrift für Physic» получила критический отзыв от Эйнштейна, который писал: «Результаты, касающиеся нестационарного мира, содержащиеся в работе [Фридмана], кажутся мне подозрительными. В действительности оказывается, что предложенное в ней решение не удовлетворяет уравнения поля». Фридман написал Эйнштейну письмо, приложив детали расчетов вместе с просьбой: «Если вы найдете мои расчеты правильными, прошу вас сообщить об этом редакторам журнала “Zeitschrift für Physic” — возможно, в этом случае вы опубликуете поправку к своему заявлению или разрешите опубликовать часть этого письма». Эйнштейн получил это письмо лишь через несколько месяцев — он путешествовал по Японии, но когда прочел его, то отписал в журнал, сообщив, что его критика основывалась на ошибке в его вычислениях: «Думаю, что результаты расчетов Фридмана правильные и проясняют ситуацию». Но Эйнштейн считал, что результаты Фридмана представляют только математический интерес. Не будучи знаком с работой Фридмана, бельгийский астроном и священник Жорж Леметр в 1927 году опубликовал заметку, в которой продемонстрировал те же результаты. Ни работа Фридмана, ни работа Леметра не привлекали особого внимания до 1931 года, в котором Эддингтон опубликовал заметки

Леметра в английском переводе, а Леметр представил свои идеи о «реликтовом атоме» в лекциях, прочитанных в Лондоне в Британской ассоциации по развитию науки. Можно сказать, что тем самым было положено начало зарождению космологии большого взрыва, которая находится в центре наших представлений о происхождении Вселенной.

Работая в том же направлении, Говард Робертсон и Артур Уокер также нашли общие космологические решения уравнений Эйнштейна, и эти решения Фридмана-Леметра-Робертсона-Уокера являются основой для наших современных моделей космологии. Все эти решения ставят в основу происхождения Вселенной большой взрыв: то есть они описывают Вселенную, которая развивалась (и продолжает развиваться) из математической сингулярности, когда все пространство было сконцентрировано в одной точке.

Чтобы понять, как Вселенная росла после начального катастрофического взрыва, представьте Вселенную только в двух измерениях конечного размера, но без границ, как поверхность воздушного шара. По мере раздувания шара его поверхность увеличивается: Вселенная становится больше. Если на поверхности шара есть пятна, представляющие галактики, то по ходу времени шар увеличивается и пятна на его поверхности, как галактики во Вселенной, начинают отдаляться друг от друга (рис. 11.1). Тогда для данной модели Вселенной большой взрыв будет моментом, когда шар был таким маленьким, что его можно принять за точку. Возможно, нелегко перейти к трем измерениям, но это то, что вы должны сделать, чтобы представить общую картину большого взрыва и конечного пространства без границ, расширяющегося по ходу времени.

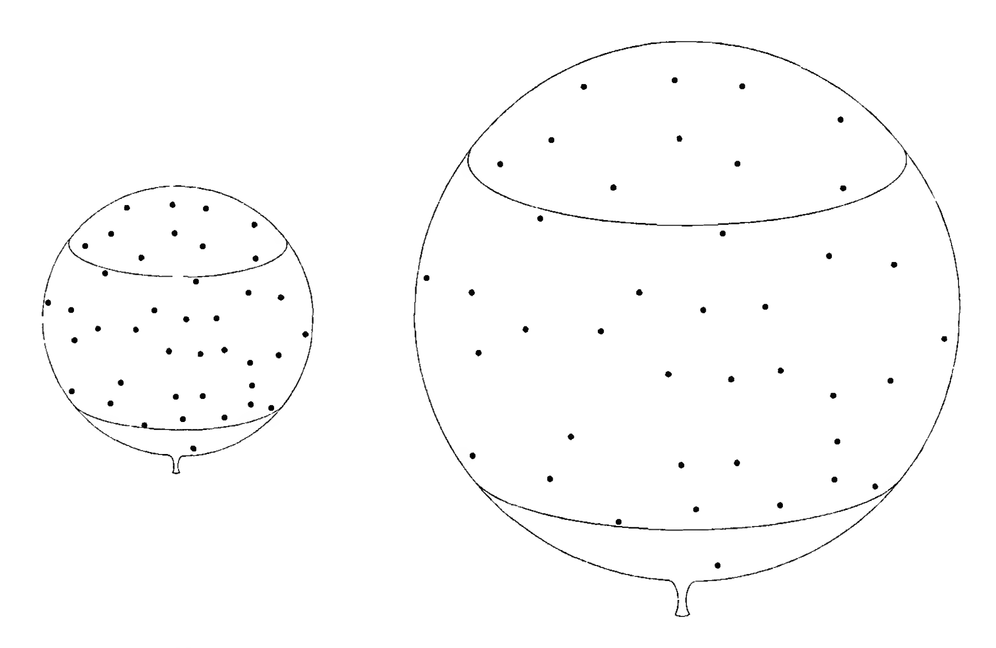


Рис. 11.1. Модель расширяющейся Вселенной, поверхность воздушного шара. Точки представляют галактики, и по мере расширения шара они удаляются друг от друга

Решения уравнений Эйнштейна Фридманом, Леметром, Робертсоном и Уокером позволяют нам произвести экстраполяцию в обратном направлении — от нынешнего состояния Вселенной к моменту ее рождения во время колоссального взрыва. Уравнения связывают размер наблюдаемой Вселенной и плотность материи и энергию, которую она содержит, с ее возрастом в любой период, а статистическая термодинамика связывает энергию и плотность материи с температурой. Конечно, предположениям о самых первых мгновениях после большого взрыва, может быть, и не стоит доверять, но по прошествии 10^{-32} секунд времени они становятся все более надежными. Расширение, вызванное большим взрывом, привело к снижению температуры с 10^{25} K за 10^{-32} сек времени до 2,7 K фоновой космической радиации в настоящее время. Вся Вселенная, наблюдаемая сейчас, была в 10^{-32} сек времени сжата до размера около одного метра. Считается, что при такой плотности и температуре «поведение» материи отличается удивительной «простотой». Частицы и античастицы всех видов безостановочно взаимодействуют, объединяясь и вновь возникая из жесточайшей радиации, заполнившей все пространство. Несмотря на эту лихорадочную активность, как материя, так и радиация были близки к состоянию теплового равновесия и, следовательно, подчинялись законам статистической механики, соответствующим их условиям, что означает, что для определения их отличительных свойств необходимо знать только характерную для этого периода температуру. А температуру можно установить, проводя исследования в обратном направлении от того, что мы наблюдаем сейчас. Убедительной эту космологическую модель делает то, что из нескольких правдоподобных предположений следует огромное число прогнозов, которые можно проверить путем наблюдений.

При температуре 10^{25} K характерная энергия столкновений между частицами будет такой высокой, что, согласно стандартной модели физики частиц, электромагнитные и слабые ядерные силы унифицируются, как в теории электрически слабых взаимодействий, перед тем как произойдет внезапное нарушение симметрии (см. главу 8). Материя в то время существовала в форме кварков и лептонов и их античастиц. Ко времени 10^{-12} сек после большого взрыва температура снизилась достаточно, для того чтобы электромагнитные и слабые взаимодействия разделились, а спустя почти микросекунду кварки смогли соединиться, чтобы образовать нуклоны — протоны и нейтроны. Но для существования устойчивых атомов и даже ядер было пока слишком жарко, и материя пребывала в состоянии плотной плазмы из нуклонов и лептонов, производимых сериями в электромагнитной радиации — все это при температуре миллион миллионов градусов, 10^{12} K. (Плазма — это состояние материи, которое отличается от газа тем, что она содержит положительно и отрицательно заряженные частицы, а не электрически нейтральные атомы и молекулы. Такое состояние материи не является редкостью: 99% известной материи во Вселенной существует в форме плазмы.) Протоны, нейтроны и электроны, а также их античастицы сосуществовали примерно в равных количествах; фотоны и каждый из разнообразных видов нейтрино были в 10^9 раз более многочисленными.

Когда Вселенная «постарела» на 1 секунду, равновесие между протонами и нейтронами, удерживающееся до тех пор, могло уступить разнице в массе между ними. Нейтрон немного массивнее протона, а свободный нейтрон может в результате распада превратиться в протон, производя при этом еще и электрон, и антинейтрино; может также произойти обратное взаимодействие, но по мере снижения температуры оно становилось все более редким. Тогда установился один из решающих параметров, введенных в космологию: относительная избыточность нейтронов к протонам (в то время 1 к 5). С тех пор и далее нейтрино почти не вмешиваются в процесс посредством своих ядерных взаимодействий. Но их присутствие все еще может иметь значение для космологии из-за их большого количества, особенно теперь, когда мы уверены, что у них есть масса. Причина в том, что одним из ключевых параметров, определяющих эволюцию Вселенной, является средняя плотность содержащейся в ней массы, а масса нейтрино, пусть даже такая маленькая, какую предполагают наблюдения на Супер-Камиоканде, означает количество, сравнимое с массой всех видимых звезд.

Спустя одну минуту после большого взрыва температура упала до 10^{10} K, и для нейтронов и протонов появилась возможность объединяться и образовывать ядра. Устойчивой комбинации двух протонов и двух нейтронов не существует. Поэтому первым шагом является связывание нейтрон-протоновой пары для образования дейтронов, ядер дейтерия, тяжелой формы водорода. Дейтроны неустойчивы и легко распадаются. Только в жаркой, плотной атмосфере ранней Вселенной столкновения между дейтроном и протоном или нейтроном могли иметь место настолько часто, что, несмотря на то что шансы для успешного соединения были малы, удавалось произвести несколько ядер гелия, трития (более тяжелой, радиоактивной формы водорода) и гелия-3 соответственно. Только эти и другие простейшие ядра могли появляться в избытке, потому что столкновения протонов и нейтронов в количествах, достаточных для образования элементов даже такой сложности, как бериллий, были еще более редкими, чем столкновения, ведущие к образованию дейтерия или гелия. Спустя 10 минут все эти взаимодействия прекращаются. Относительное изобилие легких элементов, образованных в первые несколько минут, может рассказать нам о температуре и плотности и представляет собой еще один решающий блок информации, которая сильно ограничивает космологию большого взрыва. Расширение и охлаждение Вселенной продолжалось, причем материя оставалась в форме плотной массы, содержащей теперь в основном ядра водорода и гелия, с крошечными следами лития, и все это находилось в электрическом балансе с электронами и в равновесии с радиацией, у которой спектр черного тела соответствовал постоянно падающей температуре.

Когда возраст Вселенной достиг 100 000 лет, обычная энергия теплового столкновения упала ниже уровня, при котором атомы расходятся в стороны через ионизацию. Теперь впервые могли образовываться электрически нейтральные атомы. Прошло еще 200 000 лет, прежде чем большинство ионизированных атомов соединились с электронами, чтобы стать нейтральными

атомами. Материя больше не была плазмой из электрически заряженных ядер и электронов, а представляла собой нейтральный газ из водорода и гелия. Это привело к драматическому изменению во взаимодействии материи с радиацией, так как в отличие от первоначальной плазмы, газ из нейтральных атомов фактически прозрачен для света. Впервые свет мог свободно распространяться, а материя и радиация разошлись на пути к своей последующей эволюции. То, что мы сейчас наблюдаем как космическую фоновую радиацию, является нечем иным как тепловой радиацией черного тела, которая существовала в то время, а теперь охладилась в результате непрерывного расширения Вселенной с 3000 K, когда Вселенной было 300 000 лет, до 2,7 K в наше время. И температура этой радиации является еще одним решающим информационным параметром, который помогает укрепить модель космологии большого взрыва (рис. 11.2).



Рис. 11.2. Охлаждение вселенной по мере ее старения. При расширении Вселенной длина волн излучения чёрного тела, генерированного 300 000 лет спустя после большого взрыва, растянулась в тысячу раз. И температура вселенной снизилась с 3000 до 2,7 K. (С разрешения профессора М.Дж. Гриффина.)

Каковы же предположения, которые поддерживают этот сценарий рождения Вселенной? Одним из них, как уже отмечалось, является то, что уравнения общей теории относительности, которые связывают материю с геометрией, заслуживают доверия. Смысл еще одного — в том, что мы можем упростить эти уравнения, используя космологический принцип Коперника, согласно которому Вселенная в больших масштабах является однородной. Уравнение Фридмана-Леметра-Робертсона-Уокера, уточняющее этот вывод, требует все же некого дополнения. Это уравнение соединяет способ изменения размера Вселенной по ходу времени с плотностью ее энергии и давлени-

ем материи и радиации, которые она содержит в себе[1]. Закон Планка связывает плотность энергии и давление радиации с температурой — есть похожая формула, подходящая для материи (в форме газа, например).

Полученные уравнения описывают расширяющуюся Вселенную, которая является тем, что мы наблюдаем в действительности. И одним из важнейших показателей, которые можно применять для определения параметров уравнения, является постоянная Хаббла, которая выведена из текущей скорости расширения Вселенной через отношение между скоростью, с которой удаляются далекие галактики, и их расстоянием. Точное значение этой постоянной до сих пор остается неопределенным, потому что точно определить расстояние до галактик весьма затруднительно. Но большая часть астрономов и космологов сходятся на одной общепринятой величине, на основании которой возраст Вселенной может достигать 13 млрд лет.

Теоретики добиваются простых ответов, но природа может оказаться не такой уж и доброй, чтобы выдавать свои тайны! До наблюдений Хаббла и до фридмановского решения уравнений общей теории относительности Эйнштейн верил, что геометрия Вселенной является неизменной на космическом уровне. Во время поисков устойчивого решения своих уравчений он признавал, что должен быть какой-то противовес силе тяготения материи, которая в противном случае стремилась бы к точке совпадения, что привело бы к коллапсу Вселенной, а не к ее устойчивости. Это заставило его модифицировать свои уравнения и ввести в них величину, представляющую то, что известно под названием космологической постоянной, Λ (лямбда). Она играет роль противовеса коллапсу и дает возможность найти в конечном итоге простое и универсальное решение. В том же 1917 году Уиллем де Ситтер нашел еще одно решение уравнениям Эйнштейна, которое тоже было простым и однородным, но обладало одной замечательной особенностью предсказывать сдвиг к красному спектру, пропорциональный расстоянию. Вселенная де Ситтера была лишена материи, поэтому она была не очень пригодной для того, чтобы служить моделью для нашей собственной Вселенной, но она нашла неожиданное применение в М-теории (о которой мы говорили в главе 10). Она также является составной частью теории расширения, о которой мы поговорим далее. Как только Хаббл доказал, что Вселенная не является статичной, Эйнштейн отверг космологическую постоянную и пожалел, что вообще ввел ее, потому что в ней, как казалось, не было никакой необходимости. (Говорят, что он рассказывал о ее вводе как о своей самой большой ошибке.) До недавнего времени наблюдения давали основания предполагать, что она была чрезвычайно маленькой величиной, поэтому теоретическое предубеждение заставило придти к согласованному мнению о том, что она равна нулю.

Другой параметр, который должен быть введен в уравнение Фридмана-Леметра-Робертсона-Уокера, связан с плотностью массы и энергией во Вселенной. Если Вселенная содержит достаточное количество материи, ее гравитационное притяжение со временем повернет расширение в обратную сторону и Вселенная начнет сжиматься, погибая с «большим треском».

Или, может быть, «большим отскоком»! Параметр, определяющий эту ситуацию, называется омега (Ω). Если омега превышает единицу, будет «большой треск», но если омега будет меньше единицы или равна единице, Вселенная будет расширяться вечно. Критическое значение 1, которое разделяет две судьбы Вселенной, ведет к вечному расширению, но с постоянно замедляющейся скоростью. Омега является суммой двух слагаемых: одно происходит от лямбды, а другое — от плотности массы и энергии. Следовательно, важнейшей задачей для наблюдательной космологии является определение доли плотности массы в размере омеги, но эта задача оказалась необыкновенно трудной. Мы можем определить массу галактики, полагаясь на 10^{11} звезд, каждая из которых имеет массу, сравнимую с массой Солнца, и мы можем наблюдать плотность галактик во Вселенной. Но у нас есть веские причины предполагать, что при таком подходе серьезно недооценивается общая масса. Начнем с того, что не вся «обычная» материя представлена в форме видимых звезд. Разреженный газ между звездами и даже между галактиками содержит большую массу. Последние данные свидетельствуют о том, что галактика может иметь в десять раз больше массы, чем приписывается ее видимым звездам, — остальное принадлежит, вероятно, темным, мертвым, звездам или черным дырам. Некоторая часть этих доказательств получена благодаря наблюдениям за перемещением галактик — как вывод из доплеровских сдвигов звезд, которые принадлежат этим галактикам. Но наиболее убедительная причина предполагать, что во Вселенной содержится больше *темной материи,* чем мы можем догадываться, имеет другой источник — это некие пропорциональные образования из легких элементов, которые были созданы в первые несколько минут существования Вселенной.

Бо́льшая часть атомных ядер во Вселенной не изменились с тех пор, как они возникли из целого океана протонов и нейтронов в первые минуты после большого взрыва. Эти первобытные ядра были созданы в процессе термоядерных реакций, вызванных очень высокой температурой, которая способствовала сильнейшим столкновениям протонов и нейтронов. В то же время только благодаря быстрому падению температуры ядра снова не распались сразу же после образования. Тем временем происходило разрушение избыточного количества свободных нейтронов, так как они в среднем «живут» только около 17 минут до их радиоактивного распада на протоны. Можно определить соотношение разных видов ядер в образующейся смеси, а оно напрямую зависит от плотности материи, наличествующей в начале этих реакций. Исходное отношение «1 нейтрон к 5 протонам» можно установить из известных свойств физики частиц высоких энергий, а с помощью этого вводного параметра можно вычислить относительное количество дейтерия, двух разных изотопов гелия, лития, бериллия и т.д. Это нелегко! Это потребовало огромного объема вычислений, выполненных сначала Джимом Пиблсом в 1966 году и Робертом Уейгонером, затем в 1967 году — Уильямом Фаулером и Фредом Хойлером, и с тех пор их повторили уже несколько раз. При сравнении этого результата с нынешней распространенностью каждого из этих элементов (с поправкой на влияние эволюции звезд) мы получаем

очень точный показатель плотности материи в то время, когда были образованы эти первоначальные ядра.

Следующим звеном в цепи доказательств является установление связи между первоначальной и современной плотностью материи, так как мы знаем, насколько расширилась Вселенная за прошедший период времени. И тут возникло противоречие: при данном первоначальном соотношении элементов текущая плотность видимой материи оказывается *слишком* незначительной. Но как мы уже отметили, «темная материя» может объяснить недостаток массы. В число возможных компонентов недостающей массы включают WIMPs, расшифровывающиеся как «слабовзаимодействующие массивные частицы», и MACHOs, «массивные астрономические компактные ореольные тела», возможные планеты или «коричневые карлики», несостоявшиеся звезды, которые так и не стали достаточно массивными, чтобы воспламенить свое термоядерное топливо. Они могут находиться в растянутом ореоле, окружающем нашу галактику, а также в других галактических ореолах. Чтобы их обнаружить, исследователи занимаются поиском искажений, которые возникают из-за воздействия их гравитации на изображения звезд, находящихся позади них, — эффект, предсказанный общей теорией относительности. Некоторые теории физики частиц, выходящие за пределы стандартной модели, предсказывают существование частиц, называемых аксионами, и эти аксионы являются кандидатами в WIMPs. Их тоже ищут с помощью тех же экспериментов, которые практикуются для поисков нейтрино. Вид темной материи, в которой могут участвовать нейтрино, называется «горячей темной материей», так как предполагается, что такие частицы должны иметь скорость, близкую к скорости света, пока их взаимодействия с другой материей не станут такими редкими, что они «разъединятся». Однако WIMPs и MACHOs являются примером «холодной темной материи». Горячая и холодная темная материя запечатлели крупномасштабную структуру Вселенной разным способом, но современные знания не настолько глубоки, чтобы четко определить это различие. Большая часть астрофизиков выступает за благоразумное смешение этих двух групп материи, чтобы выявить недостающую массу.

Из-за ее важности для исследования структуры Вселенной проблему недостающей массы также связывают с другими фундаментальными вопросами космологии. Даже если мы пришли к единому мнению по поводу того, что происходило с момента, когда Вселенной было всего 10^{-32} сек от роду — до образования гелия 300 000 лет спустя, перед нами все равно будут стоять два вопроса. Что происходило до 10^{-32} сек? И как из первоначального газа могли образоваться звезды и галактики? Оказывается, эти два вопроса связаны друг с другом, а также со многими другими вопросами. Почему космическая фоновая радиация настолько изотропна, а температура ее черного тела имеет такой маленький диапазон колебания от одного направления к другому? Искривлена ли пространственная геометрия Вселенной подобно поверхности сферы, что делает ее закрытой и конечной? Или она изогнута в виде седла, что делает ее открытой и бесконечной? Или, может быть, она — нечто

среднее между этими двумя вариантами: плоская, но открытая и бесконечная[3]? Будет ли Вселенная расширяться всегда или она со временем изменит направление в обратную сторону и все закончится «большим треском»? Эти последние вопросы требуют, чтобы мы определили значение постоянной Ω, о которой мы говорили выше.

Хотя космологические решения уравнений Эйнштейна не требуют космологической составляющей, их можно легко модифицировать, чтобы найти для нее место. Например, Леметр это допускал. Он нашел решение для плоского пространства — пространства эвклидовой геометрии. Он также нашел два варианта решений для искривленной пространственной геометрии — в одном случае открытой, а в другом закрытой. Из наблюдений (которые представляют собой подсчет числа галактик на постоянно увеличивающихся расстояниях) трудно сделать вывод о том, которая из этих альтернатив верна для нашей Вселенной, но дополнительная информация, полученная за последние несколько лет, убедительно свидетельствует в пользу плоскостности или чего-то очень похожего. Когда речь идет о плоскости, решение уравнений требует введения очень точных данных о балансе между расширением, инициированным большим взрывом и силой тяготения материи во Вселенной, которая действует как противовес расширению. Для достижения этого баланса при отсутствии космологической составляющей необходимо такое количество материи, при котором расширение Вселенной, хотя и продолжающееся вечно, асимптотически замедлялось бы вплоть до нуля. Иначе говоря, это определяет *критическую плотность* массы (включая массу, эквивалентную энергии — $E=mc^2$ — еще раз!). При более высокой плотности, чем эта, Вселенная «закроется», перестанет расширяться и вместо этого начнет сжиматься, и в конце концов ее существование закончится коллапсом. Если плотность будет меньше критического значения, Вселенная останется открытой и будет расширяться вечно, достигнув со временем постоянной скорости расширения. Плоская Вселенная остается плоской. Но Вселенная, которая изначально не была плоской, никогда плоской не станет — она все больше и больше будет отклоняться от плоскостности. Поскольку то, что мы наблюдаем сейчас, очень близко к плоской Вселенной, она или начиналась с абсолютно плоской формы или была так необычайно близка к нему, что за 13 млрд лет продолжает, как показывают наблюдения, оставаться плоской. Этой альтернативе потребовалась бы значительная нейтрализация, что при обратной экстраполяции во времени кажется совершенно невероятным.

Но не только материя участвует в образовании общей плотности массы-энергии. Свою роль здесь играет и сам вакуум! Один из его компонентов соотносится с космологической постоянной и иногда может отсутствовать. К этому необходимо добавить один компонент из квантовой механики. Согласно релятивистской теории поля пространство содержит поля всех элементарных частиц. И даже когда эти поля имеют в среднем нулевые показатели, как в пустом пространстве, они безостановочно «возбуждаются» квантовыми флуктуациями. Эти флуктуации можно воспринимать как инициации для создания

и уничтожения частиц, так называемых виртуальных частиц, которые никогда не живут настолько долго, чтобы их можно было обнаружить. Но виртуальные частицы действительно являются частью энергетики пустого пространства — наряду с положительными зарядами одних частиц и отрицательными зарядами других. (Квантовые флуктуация в вакууме — это не просто теоретические фантомы; они смещают энергетические уровни электронов в атомах на очень небольшую, но измеряемую величину, а на более макроскопическом уровне, как показал Гендрик Казимир, они генерируют силу между близко расположенными металлическими пластинами, и это тоже было обнаружено при непосредственном измерении, подтверждающем его предсказание.) На макроскопических уровнях эти составные части имеют влияние, сравнимое с космологическим элементом, поэтому их можно совместно использовать для получения исправленной величины лямбда (Λ).

Если разделить показатель присутствия материи и вакуума в общей плотности на критическую плотность, можно получить показатель их наличия в Ω-параметре (соответственно Ω_m и Ω_Λ), что дополняет общий показатель — менее единицы, если Вселенная «закрыта», и более единицы, если она «открыта». А если Вселенная является плоской, они должны довести ровно до единицы. Как было сказано выше, Вселенная, вероятно, очень близка к плоскому состоянию. Это значит, что два этих слагаемых составляют общую величину Ω, близкую к единице. Но такое заключение вызывает неудобные вопросы. Вклад в Ω_Λ последствий квантовых флуктуаций физики частиц определить трудно, но даже самые точные оценки дают непомерно большие цифры. Возможно, существует космологическая составляющая, которая приводит к сокращению. Но это сокращение не может быть полным, так как последние наблюдения (мы это увидим) показывают, что величина Ω_Λ отличается от нуля. Чтобы получить этот показатель, необходимо сократить все, кроме одной части в огромном числе 10^{120} — производном от квантовых флуктуаций, что характеризуется невероятной степенью точности при «точной настройке».

Но история на этом не кончается. Результаты современных научных изысканий свидетельствуют о том, что даже при условии существования темной материи плотность материи не является такой высокой, а это значит, что для плоскостности требуется ненулевая величина лямбды. Величины Ω_m и Ω_Λ, наиболее удобные для фиксации этих наблюдений, соответственно близки к 0,3 и 0,7, и их можно сложить в число, близкое к 1, — величине, соответствующей плоскому пространству (рис. 11.3).

Хотя плоская Вселенная остается плоской, Ω_m и Ω_Λ имеют очень разную временную зависимость. При расширении Вселенной плотность материи уменьшается, и соглашение по умолчанию, которое предполагает правильную сумму из двух составляющих, теперь уже не сработает — если только их сумма, Ω, не будет точно равна критической величине 1. Любая другая величина свидетельствовала бы о том, что нашему времени свойственно что-то необычное, так как текущие наблюдения подтверждают тот факт, что Ω равна 1. Поскольку нет основания думать, что мы действительно живем в особое вре-

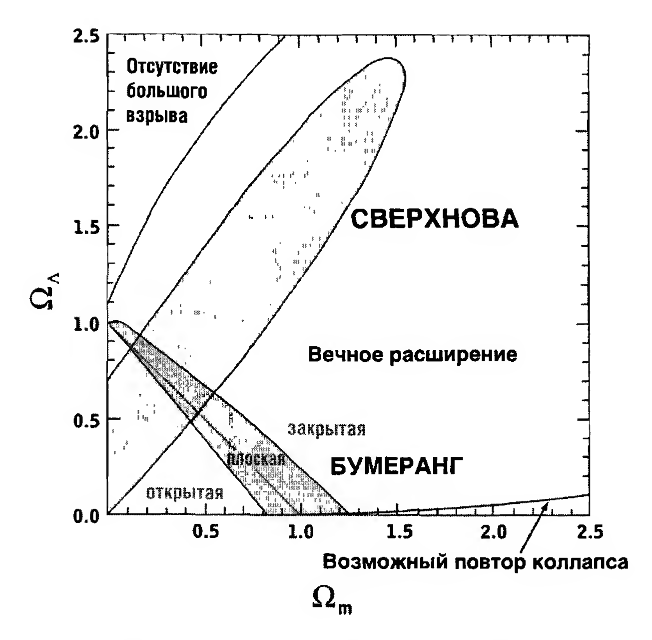


Рис. 11.3. Два комплементарных ряда наблюдений помогают определить фундаментальные космологические параметры. Наблюдения за сверхновой и космической фоновой радиацией методом пересекающихся бумерангов на одном участке этого графика показывают, что вселенная плоская, а космологическая постоянная не равна нулю. (С разрешения профессора П.А.Р. Аде.)

мя, — принцип Коперника в другом «обрамлении» — у теоретиков появляется соблазн признать модель, в которой Вселенная — плоская и всегда будет таковой, и следовательно, ее Ω равна 1. В ранней Вселенной Ω_Λ имеет ничтожно малую величину, но по мере старения и расширения Вселенной она приближается к единице; и наоборот, в более позднее время Ω_m становится все меньше, а Ω_Λ приближается к 1. На космологической шкале эпоха, когда Ω_m и Ω_Λ были одинаковыми по величине, длится очень недолго. Однако, по-видимому, мы живем именно в это время. Неужели это просто совпадение? Или, может быть, космология даст этому свое объяснение?

Показатели для Ω_m и Ω_Λ, приведенные на рис. 11.3, получены в результате двух независимых измерений. В одном из них (его данные опубликованы в 1999 году) сверхнова рассматривается в ее отношении к отдаленным галактикам. Принято считать, что все сверхновы определенного класса имеют одинаковую абсолютную светимость, поэтому их можно использовать как «стандартные свечи». Расстояние до каждой наблюдаемой сверхновы можно определить по сдвигу к красному спектру ее соседней галактики. Было обнаружено, что эти отдаленные сверхновы более тусклые, чем предполагалось, а это, в свою очередь, означает, что скорость расширения Вселенной увеличивается. Обычная материя и радиация всегда приводят к замедлению расширения, но Λ-составляющая была введена Эйнштейном именно для того, чтобы противодействовать этому, а данные по сверхновам можно ис-

толковать как свидетельство непрекращающегося действия этой составляющей. На рис. 11.3 заштрихованные участки в форме эллипсов очерчивают наиболее вероятный диапазон значений для Ω_m и Ω_Λ, совместимых с этими данными. При наблюдении за сверхновой ощущается разница между двумя составляющими в Ω — не в самой Ω, а в их сумме — и исключается нулевое значение для космологической постоянной Λ. Но они не определяют значение самой Ω.

Чтобы выявить этот неизменный фундаментальный параметр, который входит в уравнение Фридмана-Леметра-Робертсона-Уокера, нам нужны разнообразные данные. Как оказалось, разные значения Ω приводят к различным предположениям по поводу неоднородности в плотности материи в период разъединения с радиацией, когда Вселенной было 300 000 лет. Это проявилось в виде незначительных колебаниях температуры космической фоновой радиации по всему небу. В связи с этим был запланирован ряд экспериментов для измерения этих флуктуаций. Первым из инфракрасных астрономических спутников был COBE (Cosmic Background Explorer, запущенный в 1989 году), который показал, что радиация с необычайной точностью следовала планковскому распределению интенсивности по длине волны. Во время более тщательных наблюдений с помощью аппарата COBE удалось измерить отклонение от ожидаемой изотропии, вызываемой движением Земли, Солнца и галактик, в масштабах всей Вселенной, а также мелкие флуктуации температуры (на уровне 30 миллионных градуса!) сверх этой анизотропии. Эти исследования подтвердили, что во время разъединения действительно имели место колебания плотности, но они (исследования) были недостаточно точны, чтобы выявить различия, например, между конфликтующими космологическими теориями для определения того, отвечает ли горячая или темная материя за большую часть недостающей массы. Кроме того, они не помогли обнаружить и значение Ω.

В апреле 2000 года были объявлены результаты эксперимента под названием БУМЕРАНГ (Balloon Observation of Millimetric Extragalactic Radiation and Geomagnetics). В этом эксперименте был использован микроволновый телескоп, поднятый на воздушном шаре на высоту 38 км. Он смог показать с высокой степенью точности, что Вселенная является плоской и что Ω действительно имеет значение, равное 1. Результаты были подтверждены месяц спустя с помощью такого же эксперимента, названного MAXIMA (Millimeter Anisotropy eXperiment IMaging Array). Дальнейшие наблюдения, которые должны быть проведены с помощью MAP (микроволновый анизотропный зонд) (рис. 11.4), орбитального спутника, запущенного летом 2001 года, помогут выявить особенности температурных флуктуаций в микроволновом фоне с еще большей точностью. Это должно привести к более тщательному измерению Ω, и, объединенные с результатами по сверхнове, полученными в 1999 году и показавшими, что расширение Вселенной ускоряется, они помогут установить еще более выверенные значения как Ω_m, так и Ω_Λ.

Флуктуации плотности в ранней Вселенной важны еще по одной причине. Принято считать, что такие флуктуации были как бы зародышами,

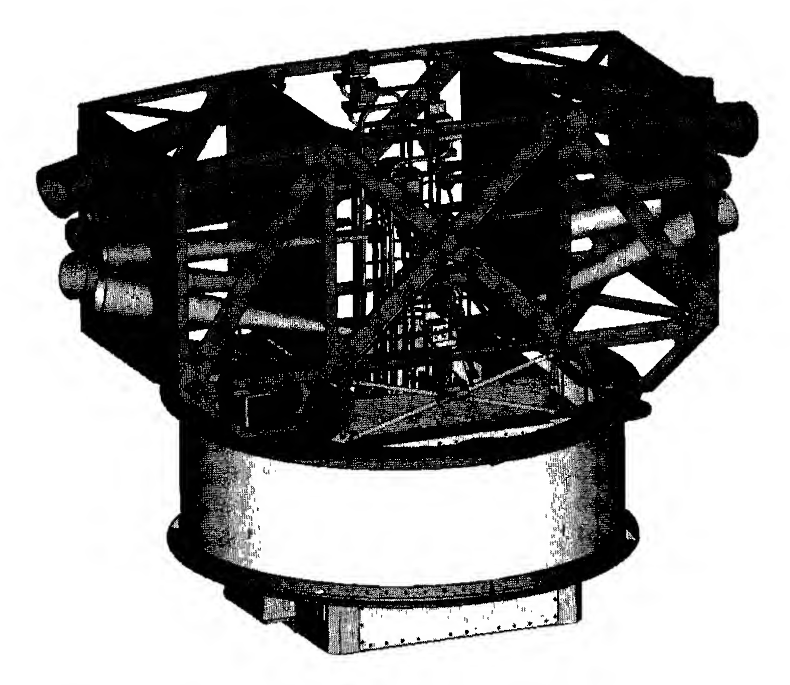


Рис. 11.4. MAP, микроволновый анизотропный зонд. (С разрешения научно-инженерной команды MAP; изображение в интернете: http://map.gsfc.nasa/gov.)

вокруг которых формировались звезды и галактики, конденсирующиеся из водородно-гелиевого газа, как капли дождя в тучах. Мы пока не можем достоверно знать, сформировались ли сначала звезды, позднее объединившись в галактики и затем в кластеры, а со временем и в сверхкластеры, или процесс шел в обратном направлении и начинался с громадных аморфных концентраций материи, из которых формировались протогалактики, внутри которых затем появились звезды. Конечно, мы можем наблюдать процесс формирования звезд даже сейчас, но это все же не дает ответа на вопрос о первенстве космического «яйца-курицы».

Тем не менее ясно, что флуктуации плотности ранней Вселенной являются ключом к разгадке. Почему они происходили? Почему Вселенная является такой плоской? Почему, в какую сторону бы мы ни повернулись, космическая фоновая радиация имеет почти одинаковую температуру, несмотря на то что ее источники так далеки друг от друга, что даже за 13 млрд лет существования Вселенной им не хватило времени как-то повлиять друг на друга? Почему фотонов настолько больше, чем протонов? Оказывается, все эти вопросы направляют внимание к еще одной проблеме. Что случилось до того, как возраст Вселенной достиг 10^{-32} сек? Если мы посмотрим назад, вновь пройдя все временные этапы, от современной Вселенной, наполненной кластерами звездных галактик, к плотному горячему газу, заполнявшему Вселенную, когда ей было 300 000 лет, еще дальше в глубь времен — к формированию прото-

нов и нейтронов из все еще горячего океана кварков и лептонов, затем далее ко времени, когда эти частицы сами находились в стадии образования, мы обнаружим, что мы вновь должны обратиться к физике высоких энергий как к ориентиру. Во временной период в 10^{-32} секунд температура соответствовала обычной энергии взаимодействия в 10^{13} GeV; эта энергия намного выше уровня, доступного самым мощным ускорителям частиц. (Ускоритель LHC лаборатории CERN спроектирован для исследования физики столкновений приблизительно при 14 000 [то есть $1{,}4\times10^4$] GeV.) Поэтому наша теория высоких энергий должна основываться на экстраполяции от более низких энергий. Следовательно, она является в некоторой степени умозрительной, но, несмотря на это, получила всеобщее признание.

Унификация слабых и электромагнитных взаимодействий в теории Глэшоу, Салама и Уайнберга связана с симметрией, которая сохраняется при высоких энергиях, но сразу же разрушается при нескольких тысячах GeV. Их теория является одним из столпов, на которых базируется стандартная модель физики частиц, и ее предсказания были проверены с высокой степенью точности. Более умозрительная унификация предполагает объединение сильных взаимодействий с электрически слабыми, с тенденцией к симметрии, которая становится очевидной только при очень высоких энергиях. Эта так называемая теория GUT (Grand Unified Theory — Великая унифицированная теория) подтверждается менее надежными экспериментальными свидетельствами. Предполагается, что в результате нарушения симметрии GUT будет выявлен механизм расширения. Ученые выдвинули такую гипотезу: когда охлаждающаяся Вселенная проходила через уровень температуры, при которой разрушается симметрия GUT, вызванное этим внезапное изменение режима взаимодействий частиц было слишком быстрым, чтобы можно было сохранить тепловое равновесие. Результатом стал период показательного роста, при котором видимая Вселенная расширилась от размера в 10^{-31} метров до нескольких десятков сантиметров всего за 10^{-32} секунд. Это расширение могло бы сгладить любое искривление в пространстве, и следовательно, могло бы объяснить явную плоскостность нынешней Вселенной. Оно могло бы также объяснить проблему горизонта — ответить на вопрос о том, почему космическая фоновая радиация, исходящая от самых отдаленных друг от друга сфер, имеет почти одну и ту же температуру, так как еще до расширения эти сейчас уже отдаленные области были достаточно близкими, чтобы иметь сходное состояние.

Здесь есть еще одна загадка. Почему во Вселенной больше материи, чем антиматерии? Или, другими словами, почему протонов и электронов так много, а антипротоны и позитроны встречаются редко? Андрей Сахаров был первым, кто в 1967 году признал, что для возникновения этого дисбаланса в ранее существовавшей симметрии необходимы три условия[4]. Одним условием было нарушение C и CP-симметрий физики частиц (см. главу 8), уже известных из экспериментов в области физики высоких энергий. Другим условием было нарушение одного из правил сохранения стандартной модели, чтобы, например, позволить протонам распадаться на позитроны.

Такой процесс никогда не наблюдался, и конечно, он идет *очень* медленно, если вообще имеет место. В конце концов, мы знаем, что протоны в звездах существуют столько же, сколько и Вселенная, а более точный экспериментальный предел среднего срока жизни протона установлен на уровне более 10^{32} лет — на много порядков больше, чем этот![5] Тем не менее распад протона не исключается, а фактически предсказан теми же самыми теориями GUT, которые используются для объяснения расширения.

Третье условие Сахарова для преобладания материи над антиматерией относится к эпизоду в эволюции Вселенной, во время которого она лишилась теплового равновесия — и это как раз то, что происходит при расширении. Это же самое отклонение от симметрии частица/античастица может объяснить соотношение фотонов и протонов, которое мы наблюдаем сейчас. Стоит заметить, что показательное расширение Вселенной в период ее наполнения как раз является тем видом реакции, который был описан де Ситтером в 1917 году!

И это еще не все, что можно было бы сказать о наполнении, а многие детали этой идеи необходимо проверить и уточнить с точки зрения как их теоретической состоятельности, так и их видимых последствий. Достаточно сказать, что большинство космологов признают некий «вариант наполнения» как необходимый компонент модели большого взрыва, если эта модель объясняет то, что мы наблюдаем во Вселенной в настоящее время.

Остается еще один вопрос, на который я не ответил. Что происходило в еще более ранние времена — до инфляции? Если говорить о том времени, когда возраст Вселенной был всего 10^{-43} сек, а ее размер в поперечнике составлял только 10^{-35} м, сами понятия пространства и времени размываются. Потому что на этих уровнях уже невозможно игнорировать значение квантовой механики. Уравнения Эйнштейна больше не годятся для описания пространства-времени. Нам нужна квантовая теория гравитации, может быть, даже квантовая теория космологии. Наиболее многообещающий вариант, совместимый с квантовой теорией гравитации, был предложен теорией суперструн, что является одним из ее выдающихся достижений. Но его значение для события, которое мы называем большим взрывом, является пока противоречивым и непонятным. Однако по общему признанию квантовые флуктуации в геометрии пространства-времени вызвали бы появление соответствующих флуктуаций плотности в начале расширения. Они «застыли» бы в процессе наполнения и, следовательно, продолжали существовать, но в настоящее время они сильно увеличились в масштабе, даже после того как прекратили расширение. Они оставили свой след в виде путаницы и пустот в расположении галактик и мизерных колебаний температуры космической фоновой радиации то в одну, то в другую сторону.

Даже когда классическую картину дополняют квантовыми эффектами, в космологии большого взрыва по-прежнему некоторые вопросы остаются без ответа. Наиболее проблематичной является физика большого взрыва как такового. Классическая картина расширения от большого взрыва может быть проиллюстрирована еще более простым примером, нежели расширяющийся

воздушный шар на рис. 11.1: представим себе Вселенную в виде окружности круга, который расширяется по мере старения Вселенной. Затем последовательность этих расширяющихся кругов можно расположить в виде конуса, ось которого будет представлять время (рис. 11.5). Вы можете подумать, что это будет трудно сделать, но вы не должны обращать внимания на то, что ваш конус «погружен» в знакомое трехмерное пространство, одно из измерений которого обозначает время. Вершина этого конуса, представляющего сам большой взрыв, является сингулярной точкой — точкой, которая отмечает начало времени, в котором плотность материи во Вселенной была бесконечной. Из этого можно было бы заключить, что все законы физики в это время нарушены, что заставляет нас задаваться вопросом «Как все начиналось?», на который нет ответа. Одна интригующая умозрительная теория содержит в себе идею о том, что никакой сингулярности не было и что законы физики по-прежнему можно применять к анализу трансформаций большого взрыва. Эту теорию «без границ» предложили Стивен Хокинг и Джеймс Хартл. Она строится на понятии, уже широко используемом в квантовой теории поля и теории струн, — понятии *воображаемого времени*. При выполнении расчетов в теории поля бывает полезно представить, что переменная времени является чисто воображаемой — как это делал Минковский, когда выдвинул идею пространства-времени. Эта уловка облегчает формулирование многих этапов вычислительного процесса, а также делает их математически более выверенными. Только в самом конце вычислений переменная времени вновь становится реальной. Хокинг и Хартл предложили, чтобы мы воспринимали это не просто как математический трюк. Они утверждают, что при описании в воображаемом времени пространство-время не имеет границ: как поверхность сферы, она конечна, но безгранична. Начало Вселенной представлено

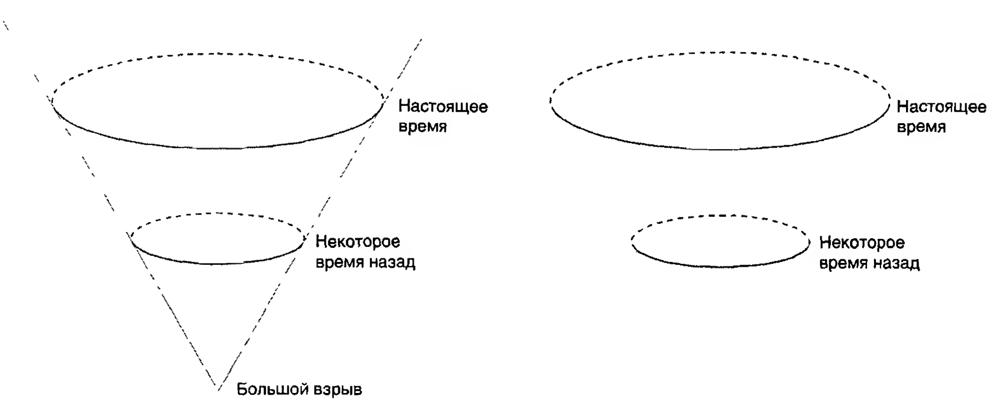


Рис. 11.5. Еще одна модель расширяющейся вселенной. Поверхность конуса представляет пространство-время. Круговые сечения отображают пространство в разные периоды времени. На вершине конуса — большой взрыв и пространство сжато до точки. Это сингулярность в пространстве-времени. Согласно теории Хокинга и Хартла эта точка имеет круглую форму, как предложено во втором варианте

точкой, но не сингулярной точкой. По словам Хокинга, это обычная точка пространства и времени — как Северный полюс, который на Земле является обычной точкой. Конечно, в нем встречаются все линии меридианов, но это просто следствие того, как мы чертим свои карты. Затем Хокинг и Хартл предлагают использовать законы физики для этой точки точно так же, как для любой другой, и тогда «Вселенная плавно расширялась бы из этой одной точки». Конечно, если бы мы вновь обратились к *реальному* времени, мы бы столкнулись с сингулярностью, в которой законы физики были бы нарушены. Но то, как начинала создаваться Вселенная, все равно можно описать с помощью законов физики, так как мы можем сначала произвести расчеты, используя воображаемое время, в котором сингулярность отсутствует, а в конце заменить воображаемое время на реальное. Согласно этому аргументу вопрос «Что было до большого взрыва?» основан на неправильных представлениях. И как пошутил Хокинг, это все равно что спросить, что такое север Северного полюса.

ГЛАВА 12

СПУСКАЕМСЯ НА ЗЕМЛЮ

Физика на службе у человека

Предположим, что М-теория достигнет своей цели и вскоре мы получим уникальную, «строгую» теоретическую базу для нашего понимания фундаментальных законов природы. Тогда наша текущая стандартная модель будет рассматриваться как рамочная конструкция, пригодная для описания и понимания физики частиц высоких энергий. Ее параметры больше не будут произвольными, «вводимыми вручную» извне и настраиваемыми для того, чтобы соответствовать данным, но будут определяться только исходя из принципов фундаментальной теории. Конечно, это определение может быть возможным только в принципе, потому что вычисления могут оказаться бесполезными и к тому же трудными для выполнения. И все-таки предположим, что мы знаем, что их можно выполнить, причем результаты будут однозначными. Наступит ли тогда конец физике?

Конечно нет! Химия же не закончилась только потому, что лежащие в ее основе физические представления могут быть полностью сформулированы с помощью законов квантовой механики[1]. Большинство физиков работает над проблемами, которые я даже не упоминал в этой книге, и многие из самых значительных достижений двадцатого века были совершены в исследовательских областях, далеко отстоящих от физики частиц высоких энергий и еще дальше — от теории суперструн и М-теории. Может быть, приятно осознавать, что «в принципе» квантовая электродинамика предлагает основные законы, благодаря которым можно будет расширить свои знания о физике твердого тела. Но это не поможет нам найти адекватное объяснение, например, сверхпроводимости. У сверхпроводника нет электрического сопротивления. Камерлинг Оннес открыл это явление в 1911 году, когда охладил ртуть до температуры ниже 4 K, но только в 1956 году Джон Бардин, Леон Купер и Джон Шрифер предложили объяснение его физического механизма — теорию BCS. Для некоторых видов купратной керамики сверхпроводимость характерна при более высокой температуре (77 K), при которой азот сжижается. Полагают, что механизм BCS неприменим к этим HTc-сверхпроводникам (HTc — высокая критическая температура), и общее согласие по поводу правильного альтернативного объяснения еще не достигнуто. Если бы мы лучше понимали причину их сверхпроводимости, мы могли бы получать сверхпро-

водимые материалы при комнатной температуре, и это оказало бы громадное воздействие на развитие электротехники. Но это лучшее понимание придет, конечно, не из области квантовой электродинамики!

Электрон был открыт немногим более века назад. Эксперименты Фарадея и теория электромагнетизма Максвелла, без сомнения, имели большее значение для человеческого общества, чем любая политическая революция девятнадцатого века[2]. Электричество и свет, включаемый прикосновением к выключателю, преобразили нашу жизнь. Гибкий электрон является агентом не только этих демократизирующих сил, но также электроники, которая дала толчок революции в области связи, обеспечивая наши дома и офисы информацией о самых отдаленных уголках земли. Подобно Аладдину, мы управляем «духом» лампы. Не обвиняйте физиков в незнании ответов на некоторые вопросы, которые мы задаем. Например, революция в электричестве зависит от квантовых свойств твердых тел, от особых характеристик энергетических уровней в кристаллическом кремнии. Возможность хранить информацию на компьютерных дисках в более сжатой форме основана на лучшем понимании магнитных материалов, а магнетизм сам по себе является, по сути, квантовым явлением. Дешевые компьютеры, которые сейчас можно встретить во многих домах, имеют более высокую вычислительную мощность и большую память, чем те, которые управляли первыми полетами людей на Луну. Не выходя из своих домов, мы имеем доступ к развлечениям и информации благодаря международным сетям связи, соединенным стекловолокнами, передающими множество сообщений, и все это с эффективностью и экономичностью, невозможной без этой замечательной технологии. Между прочим, WWW (Всемирная паутина) была разработана в CERN, чтобы облегчить передачу информации между исследовательскими группами в области физики частиц, совместно работающих над большими программами. В настоящее время она обеспечивает миллионам людей выход в киберпространство, дает читателям больше информации, чем они могут найти в местных библиотеках, а также (если они захотят) данные о физических экспериментах[3].

Мне бы хотелось, чтобы вы получили представление о широком диапазоне потрясающих исследований в физике, проводимых в настоящее время в областях, которые пока не имеют статуса передовых отраслей ядерной физики, астрофизики или космологии. Кроме этих есть и другие направления — либо разрабатывающиеся в экстремальных условиях, либо требующие предельной точности. Такого рода физическая наука развивается скорее в университетских лабораториях, нежели внутри огромных международных комплексных сооружений, в которых размещены ускорители или телескопы. Здесь тоже можно стать свидетелем взаимодействия между техническим прогрессом и научным открытием, и при этом каждый «питается» за счет другого. Насосы Отто фон Герике, придуманные им в семнадцатом веке, давно заменены — Джеймсу Девару потребовалась более совершенная вакуумная техника для изобретения его вакуумной колбы, знакомой нам по колбе термоса для пикников. Колбы Девара являются основой для криогеники, исследования и использования низких температур, которые привели Оннеса к сжижению гелия и вслед за этим — к его открытию сверхпроводимости. В настоящее вре-

мя для некоторых отраслей физики нам нужны, и мы вполне можем их получить, такие низкие величины давления, которые составляют миллионную от миллионной атмосферного давления.

Как и в прошлом, новая технология и новые области применения являются основой большей части экспериментальных открытий, которые, в свою очередь, провоцируют новые, а также подтверждают подлинность успехов теоретических разработок. Иногда наблюдается очень быстрый переход передовой технологии из лаборатории в промышленность и сферу широкого потребления. Но порой проходят десятилетия, прежде чем данные разработки найдут практическое применение. Теория стимулированной эмиссии, от которой зависит лазерная технология, была сформулирована Эйнштейном в 1917 году в одном из его наиболее глубоких научных трудов по квантовой физике; по иронии судьбы он так и не смирился с разрывом с классическим детерминизмом, развитию которого способствовала его работа. Только в 1960 году были продемонстрированы возможности первого лазера[4]. В течение нескольких лет о лазере говорили как о решении, которое ищет свою проблему, но теперь лазеры занимают значительное место в исследовательских лабораториях, так же, как и в других многочисленных областях применения, будь то хирургия, считывание штрихового кода на контроле в супермаркетах или сканирование записей в CD-плеерах. В этом временном интервале от фундаментальной науки до многомиллионного промышленного производства нет ничего необычного, и это должно быть предупреждением для тех, кто ждет быстрой окупаемости затрат на исследовательские работы. Работы Эйнштейна совершенно не были ориентированы на выполнение какой-то определенной «миссии», но в конечном счете они окупились!

Лазеры оказали значительное влияние на фундаментальные исследования — точно так же, как на сферу торговли и домашние развлечения! Лазерный свет является в высшей степени монохроматичным, то есть он имеет резко выраженную длину волны. Кроме того, он когерентен, то есть волны остаются синхронными друг другу в пространстве и времени. Лазерный свет также может быть очень интенсивным, а лазерные импульсы могут быть очень короткими. Именно эти свойства лазера, кроме прочих, делают его незаменимым инструментом в исследовательских работах в области физики, что позволило создать новую отрасль физики — квантовую оптику. Спектроскопия имеет долгую историю использования в атомной и молекулярной физике. Взаимодействие атома со светом зависит от внутренней структуры атома или молекулы: он может поглощать фотон только с «правильной» длиной волны, чтобы совершить квантовый переход на более высокий энергетический уровень. Таким же образом, если впоследствии он излучает фотон, длина волны будет зависеть от уровней квантованной энергии атома или молекулы, и эти энергетические уровни связаны с его структурой. Такое свойство лазера, как точность, стало активно использоваться в новых областях, например в изучении окружающей среды, где лазеры применяются для обнаружения следов загрязняющих веществ очень низкой концентрации. Так как длина волны, которую «видит» движущийся атом, соотносится с доплеровским сдвигом,

лазерная спектроскопия может произвести дифференциацию между движущимися атомами и атомами в состоянии покоя и ее можно использовать для изучения кинетики химических реакций.

Лазеры могут также быть инструментом для «отлавливания» одиночных атомов или очень разреженных облаков атомов и приведения их почти в неподвижное состояние, что позволяет изучать их с большей точностью, чем когда они находятся очень близко друг к другу, — как в твердом теле или жидкости, даже в газе в нормальных условиях. При комнатной температуре атомы и молекулы в воздухе движутся в разных направлениях со скоростью около 4000 км/ч, сталкиваясь друг с другом. При низкой температуре их скорость падает, но при низких температурах газы сжижаются или затвердевают, и атомы взаимодействуют друг с другом более сильно. Охлаждая газ при сильно пониженном давлении, можно подавлять конденсацию вплоть до такого состояния, которое позволит начать изучение атомов без помех от их частых столкновений или взаимодействий. Но атомы все равно продолжают двигаться в разных направлениях, и вследствие этого спектральные линии расширяются из-за доплеровского эффекта. Для возможно большего замедления движения атомов Стивен Чу, Клод Коэн-Таннауджи и Уильям Д. Филлипс разработали лазерные методы, которые помогли достичь этой цели при условии охлаждения газов до температуры в пределах нескольких миллионных градуса выше абсолютного нуля.

Если лазер настроен на длину волны выше той, при которой он будет поглощен атомом в состоянии покоя, фотон в лазерном луче может быть поглощен только атомом, движущимся в сторону лазера, потому что в этом случае атом «видит» его с голубым сдвигом к более низкой длине волны под действием доплеровского сдвига. Атом затем замедляется, и даже если он даст обратный ход и наберет скорость при испускании фотона, направление отдачи будет произвольным. Чистый эффект состоит в том, чтобы снизить среднюю скорость атомов, движущихся в сторону лазера. Стивен Чу и его коллеги остановили пучок из атомов натрия, входящий в вакуумную камеру, направляя атомы прямо к лазерному лучу, а затем «подтолкнули» их к ловушке. Это было сделано с помощью трех пар лазеров, установленных под прямым углом друг к другу, при этом их лучи пересекались в одной и той же точке. В результате средняя скорость всех атомов в зоне пересечения лучей еще больше снизилась, и облако атомов натрия было «поймано» в ловушку. Любой атом, пытавшийся вырваться из ловушки, встречался с лазером, который отталкивал его назад. В месте пересечения лучей атомы замедляли движение, как будто они двигались в патоке: отсюда появилось название такой установки — *оптическая патока.*

Ловушка такого типа «протекает», потому что атомы выпадают из нее — в прямом смысле, из-за силы тяжести. Чтобы удержать их более одной секунды, потребовалось еще одно изобретение, которое добавило в лазерную систему магнитное поле, а оно обеспечило силу, компенсирующую вес атомов. Дальнейшие усовершенствования, внесенные Коэном-Таннауджи и Филлипсом, позволили снижать температуру вплоть до 0,2 микроК, то есть двух десятых от миллионной градуса выше абсолютного нуля. При такой

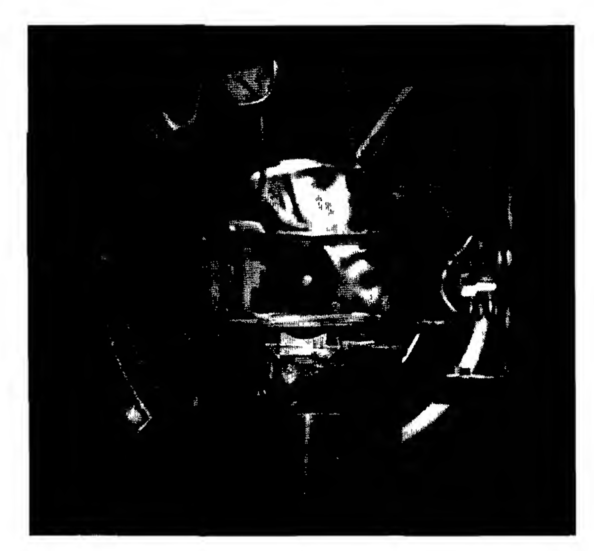


Рис. 12.1. На этой фотографии показано около миллиона атомов натрия, удерживаемых в магнитно-оптической ловушке, описанной в тексте. (С разрешения Национального института стандартов и технологии, Гейтерсбург, Мериленд.)

температуре атомы гелия обычно имеют скорость всего 2 см/сек. (Сравните эту величину со средней скоростью атомов в газе при комнатной температуре, которая равна 4000 км/ч, см. рис. 12.1.)

Исключительная когерентность лазерного излучения используется в интерферометрии, еще больше расширяя диапазон применения этой и без того уже мощной техники. В интерферометре — таком, какой был использован Майклсоном и Морли, когда они пытались обнаружить признаки прохождения земли через эфир, — луч света расщепляется на две части (например, с помощью наполовину посеребренного зеркала), и обе эти части, проходя разные пути, вновь объединяются. Та степень, в которой эти две части теперь усиливают или подавляют друг друга, обеспечивает очень точное измерение разницы пройденного ими пути, вплоть до мизерной величины длины световой волны. Разница пути, по которой видны эффекты интерференции, ограничена расстоянием, на протяжении которого свет остается когерентным. Отсюда преимущество использования лазерного света, поскольку когерентность теперь может длиться до 100 м, а не несколько сантиметров — самое большее, что можно получить иным способом.

В Кентербери, Новая Зеландия, группа, возглавляемая Джефом Стедманом, разработала кольцевой лазер, который отражает лучи по квадрату, при этом один идет по часовой стрелке, а другой — против часовой стрелки. Получаемая интерференционная картина — 11 млн. узлов и антиузлов, расставленных по окружности кольца — остается стационарной относительно локальной инерциальной системы отсчета. Но вращение Земли несет тело кольца по кругу в этой системе, поэтому узлы и антиузлы проходят мимо зеркал и детектора, генерируя частоту биений в свете, исходящем из коль-

ца. В результате была получена частота 69 Гц (74,9 Гц в усовершенствованном варианте установки, начавшей действовать в 1998 году). Если эту частоту пропустить через громкоговоритель, вы можете «слышать» ритм вращения Земли. Кентерберийскую систему можно рассматривать как кольцевой лазерный гироскоп, причем он намного чувствительнее, чем гироскопы, используемые для аэронавигации, — фактически лучше, чем любое другое техническое средство, используемое для считывания информации о вращении Земли, и способно быстро обнаружить малейшие изменения в ее скорости, вызванные сейсмическими сдвигами или приливами[5].

Еще одним преимуществом лазеров является резкая направленность их лучей — они едва ли вообще отклоняются. Даже пройдя 5 млн км, разделяющих три спутника, образующих треугольный интерферометр LISA (см. главу 9), можно видеть лазерный луч, идущий от одного к другому. Он спроектирован для обнаружения изменений в расстоянии, отделяющим этот космический комплекс с точностью до 2×10^{-11} метров (это точнее, чем $1/10^{20}$!). Такая точность необходима для обнаружения гравитационных волн, которые могут исходить от окружающих черную дыру областей в центре галактики.

Это наблюдения космического масштаба. У лазеров есть более практичные сферы применения и исследования, но это не делает их менее впечатляющими. Расстояние до Луны было измерено с точностью до 15 см путем измерения времени, которое было потрачено на отражение лазерного импульса обратно на Землю от угловых рефлекторов, установленных на Луне астронавтами с корабля «Аполлон». Другие области применения, которые зависят от интенсивной направленности лазерного света, включают *оптические пинцеты и оптические ножницы.* Плотно сфокусированный лазерный луч будет притягивать в свой фокус небольшие прозрачные объекты, и затем их можно будет передвигать лучом как пинцетом. Одиночные молекулы можно «метить» флуоресцентным маркером и прикреплять к крошечным частицам размером менее одной тысячной доли миллиметра в поперечнике. Затем их можно захватывать лазерным лучом пинцетов и передвигать с помощью чувствительных и точных пьезоэлектрических элементов управления[6]. Таким способом мы теперь можем манипулировать отдельными молекулами и, например, измерять силу, необходимую для разделения нитей двойных спиралей ДНК, или силу одной молекулы миозина, когда она растягивается по актиновой нити в процессе мускульного сокращения (цветная иллюстрация 18).

Интенсивность лазерного света может быть использована для разрезания листов стали — как в известных фильмах о Джеймсе Бонде. Но он может выполнять и более деликатные операции. Сфокусировав лазерный луч в одной клетке на органелле (например, митохондрион или хлоропласт), можно сделать изящную микрохирургическую операцию, не повредив другие клетки. Можно таким образом использовать оптические ножницы, чтобы разделить хромосомы в одной живой клетке.

В CD-плеерах используются твердотельные лазеры, отличающиеся от газовых лазеров, часто используемых для научных исследований. Твердо-

тельные лазеры также используются для поддержки цифровых сигналов в оптических средствах связи, причем лазерный свет передается по стекловолокнам, которые в настоящее время обеспечивают значительную часть телефонного трафика в мире. Оптические линии связи имеют множество преимуществ по сравнению со старомодными медными проводами: импульсы не растягиваются один за другим при прохождении по волокнам, их можно усиливать, чтобы поддержать уровень сигнала на больших расстояниях, и в одном канале можно «упаковать» множество сообщений. Оптоэлектроника пока еще слишком молода для использования в вычислительной технике и системах обработки данных, но я надеюсь, что скоро она бросит вызов силиконовым технологиям.

Совсем недавно появился еще один вид интерферометрии, использующий не фотоны, а атомы. Так же, как фотоны являются материальным проявлением того, что классически рассматривалось как волна, так и комплиментарность между свойствами частицы и волны проявляется у таких элементов, как электрон, а также у атомов или даже у молекул. Атомная интерферометрия использует волновые свойства в атомном пучке. До недавнего времени мы не знали, как делать оптические элементы, — например, зеркала — которые не разрушали бы когерентность квантовых волн, необходимых для интерференции, но в настоящее время этот технический барьер преодолен. Так как длина волны у атомов намного меньше, чем у света, атомные интерферометры имеют потенциальную возможность улучшить чувствительность оптических интерферометров на коэффициент в 10^{10}. Несмотря на то что сделаны лишь первые шаги на пути развития, Марк Казевич и его сотрудники в Йельском университете создали гироскоп атомного интерферометра, который может обнаружить вращения в тысячи раз более медленные, чем вращение Земли на ее оси.

Возможность манипулирования одиночными атомами оказала огромное влияние на фундаментальную физику, что, в частности, способствовало развитию новых подходов к старым проблемам. Например, «неустойчивый разрыв», упомянутый в главе 4, в самый разгар споров о квантовой механике подвергся тщательному анализу, чего до этого не делалось, в эксперименте Сержа Ароша в лаборатории Кастлер-Броссель в Париже. Вместо умозрительного эксперимента Шредингера теперь мы проводим реальные эксперименты: атом в микроволновой полости — аналог его кошке в ящике — может быть использован для измерения и отслеживания декогерентности, вызванной взаимодействиями с окружающей средой, и следовательно, для проверки широко распространенного мнения, что именно они являются причиной перехода от квантового наложения к классической достоверности.

В то же время следует любой ценой избегать декогерентности, вызываемой взаимодействиями с окружающей средой, если вы хотите воспользоваться еще одним достижением, ставшим возможным благодаря квантовой механике. Этим достижением является квантовый компьютер. С момента появления аналитической машины сэра Чарльза Баббиджа (рис. 12.2) и ее усовершенствованного варианта — современного компьютера, подход к вычислительным операциям был в основном линейным, поэтапным. Конечно,

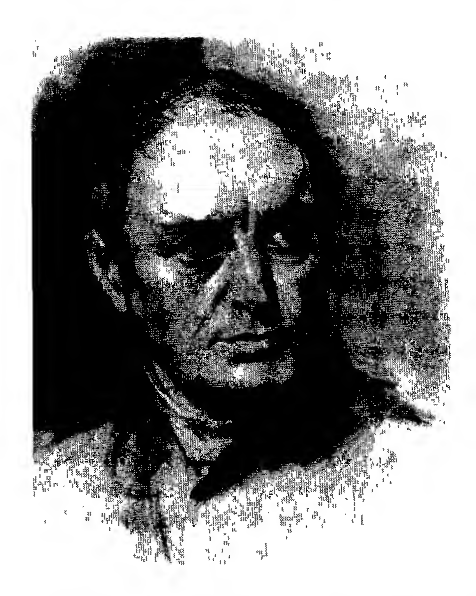


Рис. 12.2. Сэр Чарльз Баббидж, прародитель программируемого компьютера. Портрет. (Художник Лоуренс, воспроизведено с разрешения колледжа «Мастерс энд Феллоуз Тринити», Тринити, Кембридж.)

у нас есть параллельные процессоры, но, по существу, — это устройства, которые позволяют работать большому числу линейных машин. В квантовом компьютере множество вычислительных операций будет производиться одновременно с помощью одного базового арифметического устройства.

Если из вводных данных, на основании которых должны быть выполнены вычислительные операции, выстроить не одну цепочку чисел, а произвести квантовое наложение многих чисел, за одну операцию можно одновременно обработать все эти числа. В этой области уже достигнут большой прогресс и сделаны первые, пока неуверенные, практические шаги. Это еще одна область, в которой, по моим предсказаниям, через десять или, скорее, двадцать лет технические препятствия будут преодолены, а последствия этого будут очень важными. Ускорение, ожидаемое от успешного осуществления квантовых вычислений, будет не просто маленьким шажком на пути, по которому мы следовали в течение последних пяти десятилетий — оно открывает перспективы выполнения актуальных, но простых арифметических задач за очень короткое время. Безопасность многих зашифрованных транзакций — например, финансовых межбанковских переводов — зависит от криптографии, которая, в свою очередь, зависит от очень трудной задачи нахождения простых чисел для разложения на множители очень большого показателя. Если бы это можно было сделать со скоростью, теоретически допускаемой для квантового компьютера, код можно было бы взломать за считанные часы, а не за миллионы лет, которые отводятся на это в соответствии с временной шкалой надежности ключа к шифру.

К счастью, наши кредитные карточки будут в безопасности: квантовая механика может прийти на выручку, предложив более надежную форму

криптографии. Благодаря странным последствиям квантового наложения не только возможна безопасная передача информации, но и законные пользователи системы также сразу узнают о несанкционированной попытке проникнуть в нее, так как сама попытка взлома разрушит когерентность, на которой строится принцип действия системы.

Квантовая когерентность является основой еще одного важного достижения. Когда температура в системе снижается, также снижается и средний уровень кинетической энергии произвольного движения ее атомов или молекул — по сути, температура является показателем энергии этого произвольного движения. При низкой температуре начинают проявляться квантовые эффекты, потому что частицы одного вида неотличимы одна от другой. Например, все электроны похожи друг на друга. Но электроны — это фермионы, а это значит, что они подпадают под принцип исключения Паули: никакие два электрона не могут одновременно находиться в одном и том же квантово-механическом состоянии. Следовательно, при самой низкой температуре, при абсолютном нуле электроны «заполнят» доступные им места, начиная с самых низкоэнергетичных, и будут подниматься вверх по «энергетической лестнице» до тех пор, пока все электроны не будут расположены по своим местам. Бозоны ведут себя по-другому, так как принцип Паули к ним не применяется: когда температура падает, все большее их число занимает пространство с самым низким энергетическим уровнем. Когда число бозонов в этом одном квантовом состоянии становится макроскопическим, причем все имеют одну и ту же волновую функцию, система начинает вести себя очень интересно. Например, в жидком гелии с температурой ниже 2 K значительная часть атомов (со свойствами бозонов) находится в одном и том же состоянии. Жидкость течет без трения, она становится *сверхтекучей*. Теория сверхтекучести многим обязана работе Льва Ландау, который за свои открытия в 1962 году был награжден Нобелевской премией. Теория BCS сверхпроводимости связана с этой работой, поскольку она предполагает, что электроны в сверхпроводнике могут быть связаны по два, и эти пары начинают тогда вести себя как бозоны и в действительности становятся сверхтекучими и несут с собой постоянный ток, который характерен для сверхпроводимости.

Но и в сверхтекучем состоянии, и в сверхпроводниках бозоны продолжают взаимодействовать друг с другом. Задача состояла в том, чтобы заставить бозоны действовать таким же образом в ситуации, в которой они так далеки друг от друга, что их взаимодействие является ничтожно малым. Тогда бы они стали «боз-эйнштейн конденсатом», впервые описанным Эйнштейном в 1925 году. Это состояние было названо пятым состоянием материи (другими являются известные газовое, жидкое, твердое и менее известное — плазма). Наконец, в 1925 году условия для получения боз-эйнштейновского конденсата были созданы, и около 2000 атомов рубидия были охлаждены в ловушке до температуры менее 170 миллиардных градуса выше абсолютного нуля. Как говорили исполнители эксперимента Эрик Корнел и Карл Уайман, они получили самую низкую во всей Вселенной температуру, если только физики в другой Солнечной системе не провели такой же эксперимент! Исследование

этой экзотической формы материи является областью, в которой бурно развивается научная деятельность. Например, свет можно очень сильно затормозить, если пропускать его через боз-эйнштейновский конденсат. Группа, руководимая Лен Хо в Гарвардском университете, и Институт науки Роланда замедлили скорость света до 38 миль/час! Хо говорит, что она уверена в том, что техника связи, телевизионные установки и устройства ночного видения скоро будут усовершенствованы благодаря экспериментам ее научно-исследовательской группы.

В 1959 году Ричард Файнман, один из пионеров квантовой электродинамики, провел диспут на встрече Американского физического общества в Калифорнийском технологическом институте — диспут, который сегодня считается классическим. Он назывался «Внизу есть много места: приглашаем посетить новую область физики». «Эта область совершенно не похожа на другие, — говорил он, — в том смысле, что она почти ничего не говорит нам о фундаментальной физике... самое важное — это то, что у нее будут широчайшие возможности для использования в технике». Файнман ссылался на то, что сейчас называется *нанотехнология*, то есть физика и проектирование устройств на уровне всего лишь нескольких атомов: «В 2000 году, оглядываясь на прошедший век, люди будут удивляться, почему до 1960-х никто не начал серьезно заниматься этой темой». Он предложил две премии по $1000 в надежде, что ему не придется долго ждать претендентов. Одна премия предназначалась для того, кто первым сконструирует действующий электродвигатель, который можно будет разместить в кубе размером 1/64 дюйма. Этот приз нашел своего обладателя через год. Другая премия назначалась за уменьшение площади информации на книжной странице до размера в 1/25 000 в линейном масштабе, с тем чтобы ее можно было прочесть через электронный микроскоп. Претенденты на эту премию пока не появились, но они скоро появятся!

Успешное стремление создавать все менее громоздкие устройства для электроники способствует появлению захватывающих изобретений в проектировании и производстве компьютеров, так как все большее количество деталей может быть смонтировано на силиконовых чипах. Пионер в области микропроцессорной техники Гордон Е. Мур, соучредитель «Интель Корпорейшн», предсказывал в 1965 году, что плотность транзисторов на полупроводниковых чипах, используемых в компьютерах, будет удваиваться каждые два года. «Закон Мура» действовал безошибочно до сего времени, но это не может продолжаться бесконечно, так как размер атома устанавливает более низкий предел для самого маленького мыслимого размера транзистора, и этот предел будет достигнут в первые десятилетия этого века. Компьютерная индустрия имеет свои виды на новые технологии, которые перейдут от планиметрии современных чипов к третьему измерению, что предполагает монтировку схем и устройств в многослойные конструкции, которые позволят «упаковать» еще большую вычислительную мощность в меньший по размеру прибор. Именно с этой целью она обращается к нанотехнологии. Но проектирование устройств все меньшего размера потребует большего, нежели

простое изменение масштаба. По мере уменьшения размера системы квантовые эффекты становятся все более относительными, и физические свойства системы становятся количественно разными. Может потребоваться большой объем исследовательских работ по изучению т.н. MEMS (микроэлектромеханические системы), чтобы осуществить этот новый вид компьютерного производства и решить другие проблемы, с которыми придется столкнуться на пути к миниатюризации.

Смежной областью, где также возможен быстрый прогресс, является разработка и использование электронных микроскопов со сканирующим зондом, которые могут изучать структуры размером с атом. Оптические микроскопы имеют разрешающую способность, ограниченную длиной волны света до 500 нанометров (5×10^{-7} метров). Но атомы в тысячу раз меньше этой величины. Электронные микроскопы могут исследовать структуры размером всего в несколько атомов в поперечнике, но смотреть на материалы, интересующие биологов, при такой разрешающей способности очень трудно, потому что для электронного микроскопа требуются сухие образцы в высоком вакууме, а подготовка такого образца может исказить или разрушить то, что нужно исследовать. Новые микроскопы работают по другому принципу, сканируя поверхность образца и воспроизводя его изображение с высокой степенью разрешения с помощью сильно заостренного зонда. Для «прощупывания» поверхности используется один из многочисленных способов сканирования, сходный с растровым рисунком телеэкрана, и получаемая информация затем обрабатывается компьютером с последующим воспроизведением изображения. Например, атомный силовой микроскоп считывает данные о силе, приложенной при прохождении зонда по поверхности, предназначенной для изображения, распознавая топографию ее мельчайших неровностей. В то же время в растровом туннельном микроскопе зонд удерживается на близком расстоянии от поверхности, и между зондом и поверхностью, которая должна быть электрически проводимой, поддерживается электрический заряд. Даже при отсутствии электрического контакта ток может идти через зазор — как следствие квантово-механического «туннелирования» электронов через то, что в классической физике было бы непреодолимым барьером. Этот туннелирующий ток считывается и используется для обработки поверхности. Варианты этой чрезвычайно гибкой техники уже коммерчески доступны и продолжают совершенствоваться.

Новый микроскоп — это только один пример из целого ряда появляющихся технических средств, которые уже совершают переход из научных лабораторий в промышленную эксплуатацию и которые основаны на своей способности манипулировать и управлять отдельными атомами, зондировать материалы на атомном уровне и изготавливать устройства в высшей степени совершенные и точные. Характеристики электронных устройств — таких маленьких, что они используют за один раз только несколько электронов, — могут радикально отличаться от транзисторов и переключателей более габаритного уровня. С увеличением понимания процессов, проходящих на уров-

не атомов и возможностей управлять отдельными атомами и молекулами появилась надежда добиться эмуляции некоторых действий атомов в живых системах или непосредственного взаимодействия с биофизическими системами. В настоящее время мы можем делать химические датчики (искусственные носы!), которые реагируют на специфические индивидуальные молекулы; вероятно, скоро мы сможем использовать бактерии для «выращивания» электронных устройств. Во время работы с такими размерами — от одной миллиардной метра (нанометр) и даже меньше — необходимо как-то видоизменить свою интуицию: квантовые эффекты начинают доминировать, а реакции материи — это не просто уменьшенный по размеру вариант ее реакций в более масштабных образованиях.

Мы можем очень многое узнать, изучая отдельные атомы, и во многих отношениях это направление исследований является весьма перспективным, потому что там речь идет о более простых вещах, а не о беспорядочных множествах атомов и молекул, с которыми мы сталкиваемся ежедневно. Но многие явления, наблюдаемые на масштабном уровне, перестают быть очевидными на мелкомасштабном уровне. Появилась совсем новая наука, занимающаяся свойствами сложных систем, будь то большие скопления более простых атомов или сообщества отдельных животных или общества людей. Мне не совсем ясно, как это исследование уровней сложности поможет выработать универсальные принципы, применимые к такому широкому разнообразию систем, но я не сомневаюсь в том, что от нас требуется понимание того, каким образом сложное поведение возникает из взаимодействия между большим числом простых компонентов, и уверенность в том, что успехи в удовлетворении этого требования будут одной из характерных особенностей науки двадцать первого века.

Эта область исследований отличается большим количеством дисциплин. Примечательно, что развитие таких различных систем, как экология, антропология, химия, экономика и политическая наука, должно иметь общие точки соприкосновения. Многим из них свойственна инвариантная (фрактальная) геометрия и идеи «самоорганизованной кругообразности». Эти идеи применяются только в физике — например, к форме песчаных дюн, диффузии и фазовым переходам — и именно поэтому физики могут внести значительный вклад в это исследование.

Многие очень сложные проблемы физики имеют прямое отношение к нашим людским заботам. Наш образ жизни в индустриализованных странах во многом зависит от доступности дешевой энергии. Мы расточительны в ее потреблении, но даже если мы научимся более экономно расходовать ископаемые виды топлива, даже если мы справимся со страхом, связанным с атомной энергией, и особенно с хранением отработанного топлива, все равно будет несоответствие между растущим спросом развивающихся стран и поставками топлива, которое им необходимо для осуществления своих планов. Большие надежды возлагаются на дальнейшее развитие термоядерного синтеза для получения экологически чистой энергии из водорода, доступного всем в избытке. Я настроен скептически, потому что это похоже на вечно

удаляющийся горизонт. Как говорится в старой шутке: «Синтез — это источник энергии будущего... и всегда останется таковым». Синтез водорода для получения гелия — это то, что дает энергию, излучаемую Солнцем. Чтобы это случилось, необходимо создать такие же условия, как на Солнце, то есть комбинацию высокой температуры и высокого давления. Наиболее обещающий подход для достижения критического порога для реакций синтеза используется в генераторах, которые создают магнитные поля для ограничения, сжатия и нагревания плазмы. Прогресс достигнут в Принстонской лаборатории физики плазмы, как с помощью их реактора TFTR (Реактор Токомак для ядерного синтеза), который получил 10 мегаватт энергии и температуру 500 млн градусов, прежде чем прекратил работу, так и в последующем эксперименте, названном Национальным сферическим торусом. Еще одно устройство, управляемое международным сотрудничеством европейских стран, имеет название JET (Совместный европейский торус, контролируемый Управлением по атомной энергии Объединенного Королевства), достигло максимальной энергии в 16 мегаватт, но даже на более скромном уровне в 10 мегаватт выход энергии удерживался всего в течение полсекунды, и больше энергии было затрачено на управление машиной, чем было получено от нее (рис. 12.3). Тем не менее это действительно является значительным успехом, и я бы хотел ошибаться со своим скептицизмом относительно ядерного синтеза как источника энергии. Несмотря на выход США из проекта, продолжается поддержка программы ITER — предполагаемого международного проекта по созданию Международного термоядерного экспериментального реактора, который, вероятно, будет базироваться в Канаде.

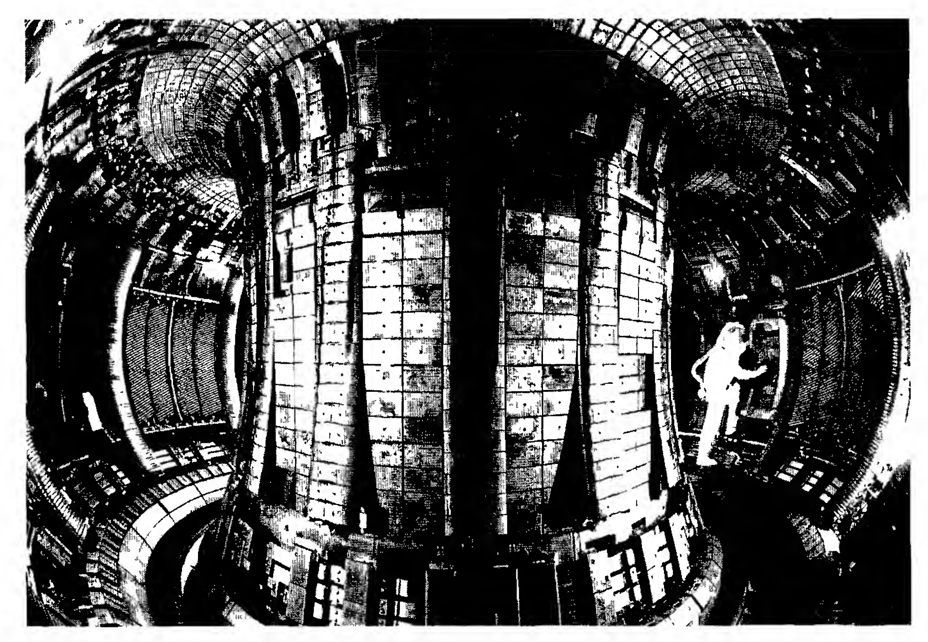


Рис. 12.3. Внутри тороидальной вакуумной камеры машины JET. Высота внутри камеры машины равна 4,2 м. (С разрешения фирмы European Fusion Development Agreement-JET.)

Строго говоря, энергия свободна, и только свободная энергия стоит дорого! Энергия никуда не уходит — она просто преобразуется из одной формы в другую. Энергия, высвобожденная во время термоядерных реакций, является энергетическим содержанием массы, потерянной при переходе водорода в гелий. Только свободная энергия является полезной и доступной для практического применения. Разница между энергией и свободной энергией подразумевает энтропию. Нам всем следует лучше понимать принцип действия энтропии. Это в действительности то, что повышает эффективность работы машин, а исследования в физике могут определять практическую деятельность практикой и способствовать прогрессу. Эти же задачи тесно связаны с необходимостью решать насущные проблемы такого масштаба, как глобальное потепление, загрязнение окружающей среды, а также в областях, связанных с термодинамикой, и все это напрямую касается нашего общества. Как мы будем решать эти проблемы, является в первую очередь политическим вопросом, но именно физика будет предлагать нам возможные варианты их решения и предупреждать нас об их возможных последствиях.

ГЛАВА 13

ЭПИЛОГ

Дорога в неизвестное

Как сказал Нильс Бор: «предсказывать тяжело, особенно будущее». Но я, возможно поспешно, сделал несколько прогнозов относительно того, что нам готовит двадцать первый век. Организации, вкладывающие средства в научные исследования, требуют представить им подробное описание основных направлений и этапов работы, чтобы составить подробную «карту» новой территории, исследовать и осваивать которую хотят физики. Теоретизирование является лишь частью планирования, а дорогостоящие эксперименты физики частиц или космологической астрономии должны планироваться на десятилетия вперед. Это означает, что в этих областях главные цели предстоящих долгосрочных исследований были уже тщательно изучены и отобраны комитетами и спонсирующими организациями.

Поэтому с некоторой долей уверенности я могу утверждать, что бозон Хиггса будет открыт на ускорителе Теватрон в Фермилабе (Национальная лаборатория ускорителя США в Батавии, штат Иллинойс), а если нет, то появится какая-нибудь новая концепция, объясняющая успехи стандартной модели[1]. В любом случае, я надеюсь, что к 2020 году мы будем достаточно ясно представлять себе происхождение массы, что близко связано с ролью бозона Хиггса в стандартной модели. Эксперимент БаБар, а также следующий за ним, запланированный для исполнения в LHC, обеспечат решающую информацию, необходимую для понимания деталей нарушения CP-симметрии и, следовательно, причин асимметрии между материей и антиматерией во Вселенной. Одно из предсказаний от QCD, теории сильных взаимодействий, касается возможности образования кварк-глюоновой плазмы при высоких температурах, то есть состояния материи, которое согласуется с нашим пониманием нейтронных звезд и того, что случается при взрыве сверхнов. Также полагают, что на самых ранних этапах существования Вселенной кварк-глюоновая плазма была обычным состоянием частиц с сильными взаимодействиями, и что, возможно, есть такие звезды, в которых эта экзотическая форма материи преобладает. Эксперименты уже показали интригующие мимолетные картины ее образования во время высокоэнергетических столкновений между тяжелыми ионами[2], и по моим прогнозам, в следующие несколько лет мы узнаем об этом намного больше.

Согласно теоретическим предположениям элементарные частицы и их взаимодействия демонстрируют сверхсимметрию, хотя она разрушена и пока недоступна для современных экспериментов. Я уверен, что к 2010 году мы

получим убедительное доказательство теоретических прогнозов, а также в том, что будут идентифицированы первые из сверхсимметричных «партнеров» кварков, лептонов и бозонов стандартной модели. Самые легкие из них, нейтралино, являются предпочтительными кандидатами в WIMPs, которые космологи считают частицами холодной темной материи, необходимой для восполнения недостающей массы во Вселенной. Я предсказываю, что их найдут в глубине шахты в Йоркшире, Англия, где их поиском занимается группа астрофизиков и специалистов в области физики частиц.

Масса всех трех видов нейтрино будет известна к 2010 году. Данные эксперимента под названием MINOS, в котором будут использованы нейтринные колебания, полученные при направлении нейтринного луча из ускорителя Фермилаб в Иллинойсе к детектору в Миннесоте[3], станут очень важной составляющей при определении массы нейтрино. Массивные нейтрино чувствуют себя не совсем комфортно в стандартной модели, но к 2010 году мы отрегулируем их так, чтобы сохранить их лучшие свойства при одновременном размещении новых данных. Было предложено, что лучше всего это можно сделать, объединив симметрии в Великую объединенную теорию, GUT. Я готов рискнуть головой и высказать догадку, что М-теория поведет нас дальше за пределы стандартной модели и объяснит, почему у нейтрино есть масса, как их приспособить к теории GUT, а также почему существует только три поколения кварков и лептонов.

Всемирная паутина, WWW, была впервые разработана в лаборатории CERN как инструмент взаимодействия в сообществе физиков высоких энергий. Но когда ускоритель LHC заработает в полную силу в 2005 году, потребуются гораздо более совершенные средства обслуживания. Каждый из четырех детекторов ускорителя LHC будет генерировать данные со скоростью 1 петабайт (10^{15} байт) в секунду, что эквивалентно заполнению стопы CD-ROMs высотой в одну милю каждую секунду. Это огромное количество данных должно быть доступно для анализа тысяч ученых во всем мире. Современная вычислительная техника не может справиться ни с такими скоростями потока информации, ни с такой сложностью процесса анализа. Разрабатывается новая глобальная сеть, названная GRID, которая обеспечит не только распределение данных и технологию ее обработки, которую требует физика высоких энергий, но также создаст основу для научных исследований в других областях, таких как геномика и наблюдение за Землей. И без сомнения, эта сеть обеспечит техническими и программными средствами следующее поколение Интернета.

В Антарктиде телескоп, погруженный в лед на километровую глубину, чтобы обнаружить нейтрино, откроет новое окно во Вселенную. Он сделан из сотен фотоумножителей, ФЭУ, которые будут улавливать вспышки света в километровом кубе льда, чтобы обнаружить нейтрино, прошедшие сквозь Землю, и установить направление их источника. Это телескоп Айс Кью. (Его уменьшенный вариант, АМАНДА, [детекторная решетка для обнаружения антарктических мю-мезонов и нейтрино], начал действовать в начале 2000 года.) Так же, как рентгеновская и гамма-астрономия дополнили оп-

тическую и радиоастрономию, нейтринная астрономия принесет новую информацию из самых отдаленных участков космического пространства.

Микрофлуктуации температуры космической фоновой радиации, наблюдаемые по всему небу, будут измерены с большей точностью, что поможет объяснить происхождение галактик из квантовых флуктуаций в первые мгновения после большого взрыва — или же на первый план выйдет альтернативная теория, для которой потребуются другие наблюдения. Космические детекторы LISA или LIGO обнаружат гравитационные волны, а если нет, одно из главных предсказаний общей теории относительности не исполнится, что, по моему убеждению, крайне неправдоподобно. Я предполагаю, что мы узнаем о происхождении гамма-вспышек к 2005 году. Поиски темной материи откроют природу недостающей массы, являющейся ключом к решению загадки движения звезд внутри галактик и ответом на космологические вопросы о зарождении галактик и конечной судьбе Вселенной. Кроме нейтралино, поиском которых занимаются в соляной шахте в Йоркшире, могут быть еще аксионы, более легкие частицы, которые, согласно предсказаниям ученых, помогут объяснить недостаток CP-нарушения в сильных взаимодействиях. Теоретики предполагают, что аксионы могли быть образованы, когда реликтовая кварк-глюоновая плазма совершала переход в состояние ядерной материи, которое мы наблюдаем в настоящее время и в котором кварки и глюоны связаны внутри сильновзаимодействующих частиц. Эксперименты по поиску аксионов ведутся в Национальной лаборатории Лоуренса Левермора в США и в Киото, Япония. Нейтралино и аксионы являются кандидатами на участие в холодной темной материи, но продолжает существовать мнение, что необходимо небольшое количество горячей темной материи, для того чтобы объяснить образование галактических сверхкластеров из-за нарушений плотности в ранней Вселенной, — и эту роль, вероятно, сыграют массивные нейтрино.

Но даже когда факт по поводу недостающей массы можно будет объяснить, когда темная материя будет изучена, останется еще тайна расширения Вселенной. Существует ли космологическая постоянная? Или существует новый вид поля, которое генерирует универсальное отталкивание, точно так же, как гравитация генерирует универсальное притяжение? Некоторые космологи предполагают, что Вселенная заполнена так называемой «квинтэссенцией»[4]. В космологических уравнениях она вела бы себя как лямбда-член, но не являлась бы постоянной величиной и со временем могла бы измениться. Дополнительная информация о колебаниях плотности в ранней Вселенной будет получена от спутников, таких как MAP, и вместе с более убедительной теорией она поможет сделать выбор в пользу космологической константы, квинтэссенции или какого-нибудь другого объяснения ускорения расширения Хаббла. Я думаю, что ответ будет получен к 2010 году.

Прекрасные изображения галактик, полученные с помощью телескопа Хаббл из самых отдаленных для наблюдения участков Вселенной, будут дополнены другими картинами, полученными с помощью наземных приборов, использующих интерферометрию с угловым разрешением в 100 раз выше,

чем у телескопа Хаббл. Радиотелескопы обеспечат такое же разрешение при большей длине волны, а новый космический телескоп (космический телескоп нового поколения) будет зондировать космос на еще большее расстояние, и следовательно, дальше, в прошлое — к тому времени, когда началось формирование галактик. Будет построено новое поколение наземных телескопов. Университет Калифорнии и Калифорнийский технологический институт (Кальтех) объединили усилия для проектирования и постройки телескопа с главным зеркалом диаметром 30 метров, дублируемого калифорнийским телескопом CELT (очень большой калифорнийский телескоп). И как будто этого недостаточно, Южно-европейская обсерватория планирует постройку 100-метрового телескопа OWL (сверхбольшой телескоп, или может быть, обсерватория на мировом уровне). Наблюдения в инфракрасных лучах будут также способствовать накоплению данных о протогалактиках, так что к 2020 году мы будем столь же много знать о формировании галактик и их эволюции, сколько знаем сейчас о звездах внутри их.

Вот что можно сказать о развитии физики как науки, направляемом, если это необходимо, большими международными программами сотрудничества и планируемом на десятилетия вперед. Намного труднее предугадать, какие открытия будут сделаны в тех областях физики, в которых уровень явлений находится где-то между макрокосмом астрофизики и космологии и микрокосмом физики частиц высокой энергии. Я думаю, что быстрый прогресс в квантовой оптике и в области физики, занимающейся манипулированием и управлением атомами и молекулами, продолжится. Побочные результаты этих разработок будут по-прежнему прокладывать себе путь на рынки сбыта в таких диверсифицированных областях, как информационные технологии и средства связи, с одной стороны, и генетическая инженерия и фармакология с другой. К 2010 году будет разработан элементарный квантовый компьютер. В цифровых компьютерах будут использоваться электронные устройства нанометрического уровня, доводя закон Мура до его предела. Микроэлектрические механические системы (MEMS) будут переходить из исследовательских лабораторий в промышленное производство, так как мечта о молекулярных механизмах воплощается в реальность.

Менее вероятно открытие сверхпроводника, работающего при комнатной температуре, но достижение этой цели имело бы такие далекоидущие последствия, что поиски такого проводника становятся все более интенсивными. Но я был бы разочарован, если бы мы продолжили свои поиски, не руководствуясь удовлетворительной теорией высокотемпературных сверхпроводников.

Я полагаю, что контролируемая термоядерная энергия останется соблазнительным миражом на горизонте открытий в течение по меньшей мере первых двух десятилетий нового века. Но поиск альтернативных источников энергии имеет множество веских причин, из которых не самыми последними являются загрязнение и вред, наносимый окружающей среде ископаемыми видами топлива, которые мы используем в настоящее время. Необходимо постоянно и настойчиво напоминать о необходимости искать источники де-

шевой энергии, и даже если ведущие промышленные страны смогут сократить свои громадные энергетические затраты, жизненно важные потребности развивающихся стран все равно должны быть удовлетворены. Политики должны наконец занять правильную позицию, но способы получения энергии должна обеспечивать наука, а наша современная наука не отвечает текущим требованиям. Более того, мы должны решить эту проблему как можно быстрее, так как население планеты растет, а запасы топлива сокращаются.

Большая часть научных исследований в физике проводится в областях, не пользующихся известностью, где решение проблем требует тяжелой работы и больших временных затрат, а прогресс движется очень медленно. Некоторое представление о диапазоне и разнообразии этой деятельности дает перечисление тем, которые уже обсуждались на международных конференциях: последний список из более чем пятидесяти конференций, состоявшихся в течение только одного месяца, включает следующие темы: очищение и кристаллизация протеинов, радиоактивные материалы, урановое топливо, высокомагнитные поля, транспорт в беспорядочных системах, технология микрозондирования, безопасность реакторов, кремниевые устройства, алмазная технология, энергия синтеза, комплексные жидкости и биофизика, терапевтическая радиология, сложности и фракталы, электрическая изоляция и диэлектрические явления, обработка сигналов и изображений. Также в этот список входят конференции по темам, не привлекающим особого внимания. Сто лет назад физик, ведущий активную научную деятельность, мог получить полную информацию обо всем, что происходит в области физики, — понятно, что сейчас это не доступно ни одному физику. Работы, которые обсуждаются на таких конференциях, вызывают интерес, и многие из них, вероятно, найдут широкое практическое применение. Но это не тот материал, о котором сообщают крупными заголовками. Он не получит Нобелевскую премию. Как и все современные физики, я не знаю о многом, что делают мои товарищи по науке, и я надеюсь, что вы и они простят меня за недостатки моего обзора.

Я сделал рискованный шаг, осмелившись высказать свои прогнозы, и возможно, когда вы прочтете этот текст, будет уже известно, что я ошибся. Фундаментальные основы физики кажутся мне незыблемыми, и я надеюсь, что ничто их не разрушит. Но я буду очень удивлен, если это случится! В одном я уверен: сюрпризы обязательно будут. Они всегда есть.

ПРИМЕЧАНИЯ

Глава 1

1. Он сказал своему сыну: «Сегодня я сделал открытие, которое так же важно, как открытие Ньютона».

2. Сто лет назад исследователи низких температур смогли достичь температуры в несколько градусов выше абсолютного нуля; в современных опытах исследуются температуры всего в несколько миллиардных градуса выше абсолютного нуля.

3. Теория BCS названа по именам Бардина, Купера и Шрайфера, которые в 1972 году получили за свою работу Нобелевскую премию.

4. Азот сжижается при температуре –196 °С, эквивалентной 77 К, то есть 77 градусов выше абсолютного нуля; гелий остается в газообразном состоянии до температуры 4,2 К.

Глава 2

1. Томсон в возрасте 28 лет был назначен кавендиш-профессором в Кембриджском университете (на должность, ранее занимаемую Максвеллом). Он сказал о своем открытии электрона следующее: «На первый взгляд может ли быть что-нибудь менее практичным, чем тело, настолько маленькое, что его масса составляет незначительную долю от массы атома водорода?»

2. Диссертация была озаглавлена «О новом определении молекулярных размеров». В 1901 году он представил докторскую диссертацию на другую тему в университет Цюриха, но ее отклонили.

3. Эйнштейн получил Нобелевскую премию по физике за 1921 год, но не за теорию относительности, а за открытие закона внешнего фотоэффекта. Внешний фотоэффект, впервые замеченный Генрихом Герцем во время его опытов по получению радиоволн, является эмиссией электрически заряженных частиц с поверхности металлов при освещении ее лучом света. В 1900 году Филип Ленард показал, что эти частицы были такими же, как электроны, которые незадолго до этого были открыты Томсоном. Объяснение Эйнштейна строилось на идее о том, что свойства света можно рассматривать как свойства частиц, которые мы сейчас называем фотонами, и эта идея стала одним из основных компонентов квантовой теории. Фридрих Освальд номинировал Эйнштейна в 1910 году, но прошло целых десять лет, прежде чем он получил премию.

4. Ампер — это единица электрического тока, ом — единица электрического сопротивления, а вольт — единица электрического напряжения.

5. Излучается не только видимый свет; эмиссия происходит также при частотах, более низких, чем у красного света (инфракрасное излучение), и более высоких, чем у фиолетового света (ультрафиолетовое излучение). Спектр растягивается неограниченно в обоих направлениях.

6. На рис. 3.6 показана графическая кривая этой функции, основанная на данных экспериментов. Форма левой части этой кривой была получена еще лордом Рейли (который после Максвелла занял место Кавендиш-профессора в Кембридже, которое вслед за ним получил Дж. Дж. Томсон) и Джеймсом Джинсом.

7. Опыты и теоретические прозрения Резерфорда сыграли основную роль в развитии физики в двадцатом веке. Он открыл атомное ядро, предсказал существование нейтрона и, как было записано в его благодарности за награждение Нобелевской премией в 1908 году, «исследовал распад элементов и химию радиоактивных субстанций». Но его премия была не за исследования в области физики, а за открытия в области химии!

8. Роланд был одним из основателей Американского физического общества в 1899 году и его первым президентом. В своей речи по случаю первого заседания он задал вопросы, которые по сей день определяют поле деятельности фундаментальной физики: «Что такое материя, что такое гравитация, что такое эфир и проходящее сквозь него излучение, что такое электричество и магнетизм, как они связаны и какое отношение они имеют к теплу? Все это — великие проблемы Вселенной». Он внес значительный вклад в исследования электромагнетизма и теплофизики до разработки им вогнутых спектральных дифракционных решеток (устраняющих необходимость в линзах), за которые он получил наибольшую известность.

9. Гамильтон был замечательным человеком, он дружил с поэтом Уордсвортом и был превосходным лингвистом (знал латынь, греческий и иврит в возрасте пяти лет, а позже мог говорить на тринадцати «мертвых» языках). Он был назначен профессором астрономии в Тринити Колледже, в Дублине, хотя ему было всего двадцать лет и он был студентом последнего курса, но он был также известен как изобретатель *кватернионов* (обобщенное название комплексных чисел с тремя мнимыми единицами). Его так захватило это открытие, что он вырезал определяющие формулы: $i^2 = j^2 = k^2 = ijk = -1$ на камне Брахемского моста во время прогулки со своей женой. И позже он писал, возможно, не совсем скромно: «Я по-прежнему утверждаю, что это открытие представляется мне таким же важным для середины девятнадцатого века, каким было открытие течений [дифференциального исчисления] в конце семнадцатого века».

10. Максимальная или минимальная величина является экстремумом.

11. Это было близким аналогом определения прямой линии как самого короткого расстояния, соединяющего две точки, только здесь «точками» являются характеристики начальных и конечных конфигураций рассматриваемой системы, а «расстояние» определяется абстрактным (но точным) способом.

Глава 3

1. В докладе обсерватории Гарвардского Колледжа в 1912 году появляется «отчет о периодах 25 переменных звезд в Малом Магеллановом Облаке [...], подготовленный мисс (Генриетта Свон) Ливитт». В нем она отметила «примечательную связь между яркостью этих переменных и длиной их периодов».

2. Точная величина равна $2{,}99792458 \times 10^8$ метров в секунду. В 1983 году было решено зафиксировать стандартный метр, чтобы эта величина оставалась таковой.

3. Первоначальное определение Хаббла имело погрешность на коэффициент больше двух: он не знал, что существует две отдельные популяции переменных цефеид. Их открыл Уолтер Баад, наблюдениям которого за звездами в центре галактики Андромеды способствовало затемнение в районе вокруг Горы Уилсон во время Второй мировой войны. Позже он использовал 200-дюймовый телескоп Маунт Паломар, чтобы подтвердить необходимость внесения поправок в постоянную Хаббла. Фактически в оригинальном определении Хабла была еще одна причина ошибки: он спутал отдаленные звездные скопления с отдельными звездами. Тем не менее его наблюдения и закон, который носит его имя, помогли заложить основу для всей современной астрофизики и космологии.

4. Скорость расширения Хаббла позволяет определить возраст Вселенной. На основании этой скорости можно определить постоянную времени, — время Хаббла, которая, согласно последним наблюдениям, равна приблизительно 15 млрд лет. Отношение между этим временем и возрастом Вселенной — самое прямое, однако оно зависит от таких факторов, как средняя плотность материи во Вселенной. До сир пор ведутся оживленные дискуссии по поводу отдельных фактов создания космоса, но все проявляют единодушие в вопросе о возрасте Вселенной, равном 13 млрд лет, что сравнимо с возрастом самых старых звезд.

5. Я не могу поверить в то, что наша звезда — наше Солнце — такая особенная и единственная, которая связана с планетой с достаточно комфортными условиями для поддержания некой формы жизни. Обитатели Земли необыкновенно живучие и многочисленные: живые создания существуют в глубинах океана, в скалах, в невыносимых температурных условиях фумарол вулканов, в ледниках и ледяных полях. Почему же мы тогда считаем, что жизнь не может возникнуть при таком огромном разнообразии вариантов окружающих условий? Более чем вероятно, что жизнь, возникшая где-то во Вселенной, отличается от земной, может быть, намного больше, чем растущая на яблонях зебра или бацилла со шкуры бабуина. Но я абсолютно уверен в том, что жизнь существует в бесчисленных формах где-то в других местах Вселенной.

6. В число других гигантских телескопов входят сдвоенные телескопы Кек на Горе Кеа на Гавайях, каждый из которых имеет сегментированное зеркало — в четыре раза больше по площади, чем 200-дюймовый телескоп

Хейл на горе Паломар. В Чили консорциум из восьми университетов Англии построит телескоп ВИСТА — для астрономических исследований видимого и инфракрасного излучения — 4-метровый телескоп с широким диапазоном обзора.

7. Мы поговорим о черных дырах более подробно позже в этой главе, а также в главе 9.

8. Хьюиш и Белл не совсем шутили, когда назвали сигналы LGM, что расшифровывается как «маленькие зеленые человечки», так как они думали, что такая регулярность указывает на разумный источник этих сигналов.

9. Разное время окончания эволюции звезд объясняется астрофизикой. Некоторые звезды просто гаснут, как тлеющие угли, когда они исчерпали все термоядерные реакции, заставлявшие их светиться. Другие, более массивные звезды обрушиваются под тяжестью своего собственного веса, когда они израсходовали свое топливо и когда радиация, прежде предотвращавшая их коллапс, исчезает. Длительность такого коллапса зависит от их массы, но эта зависимость едва просматривается, и то благодаря возможностям квантовой механики. Если звезда не намного массивнее, чем Солнце, она со временем становится белым карликом, сначала пройдя через стадию расширения до состояния «красного гиганта». Звезды с массой 1,5-3 раза больше, чем у Солнца, становятся нейтронными, возможно, пульсарами. Но если в конце жизни их масса превышает массу Солнца более чем в три раза, ничто не может предотвратить их коллапс, и они становятся черными дырами.

10. Это была самая яркая сверхнова, наблюдаемая с Земли с 1054 года, когда было заметно образование туманности Рака. У Лоренса Маршалла в книге «История сверхновы» есть отличный рассказ об этой сверхнове (Принстон: Изд-во Принстон Юниверситы Пресс, 1994).

11. Что это была за галактика, им объяснил Роберт Дайк из соседнего Принстонского университета.

12. Физики используют температурную шкалу — шкалу Кельвина, связанную с еще более известной шкалой Цельсия, которая принимает за нулевую температуру точку замерзания воды. Но на шкале Кельвина за нуль принят абсолютный нуль в термодинамике, который соответствует –273 °С.

13. При высокой температуре атомы распадаются на заряженные ионы и свободные электроны, образуя так называемую плазму. Эта плазма в ранней Вселенной была непроницаема для света.

14. Назван в честь Чандрасекхара, которого всегда по-дружески называли этим сокращенным вариантом его имени.

Глава 4

1. «Если бы хоть на мгновение получить такой интеллект, который смог бы постичь все силы, оживляющие природу, и соответствующее положение существ, из которых она состоит, и если бы, кроме этого, этот интеллект был достаточно глубок, чтобы использовать эти знания для анализа, он бы вклю-

чил в одну формулу все виды движения как самых больших тел во Вселенной, так и самых легких атомов, то не было бы ничего, в чем он не был бы уверен, и будущее, как и прошлое, предстало бы перед его взором». *Труды,* том 1, *Аналитическая теория вероятности* (1812–1820), Введение.

2. Возьмем простой пример. Если мы обсуждаем процесс падения камня, выведенного из состояния покоя, мы получим действие умножением веса камня на высоту падения и время, которое понадобилось камню, чтобы достичь Земли.

3. Так, например, непрерывный поток времени может быть приблизительно представлен в виде отсчета отдельных секунд на цифровых часах.

4. На простом камне, который положили на могилу Планка, написано только его имя и уравнение «$h = 6{,}62 \cdot 10^{-27}$ erg/sec» (1 эрг = 10^{-7} джоулей). Измерение, сделанное в 1998 году в Национальном институте стандартов и технологий в Гейтерсберге, штат Мериленд, показало, что *h* должно быть равно $6{,}62606891 \times 10^{-34}$ джоулей/сек с точностью 89 миллиардных. (Для сравнения: работа машины, движущейся в течение секунды со скоростью 60 миль/час, составляет миллион джоулей/сек.)

5. Век крайностей: короткий двадцатый век, 1914–1991. (Лондон: Майкл Джозеф, 1994.)

6. Он также стал активным антисемитом и видным членом нацистской партии. Особенно его приводило в ярость высокая оценка теории относительности «этого еврея Эйнштейна». В своей автобиографии он писал, что теория относительности «была подделкой, которую можно было сразу же выявить при наличии более широких сведений о расовых вопросах, так как ее родитель Эйнштейн был евреем». (*Erinnerunger*, неопубликованный машинописный текст (1943), цитата в книге Алана Д. Бейерохена «Ученые под властью Гитлера» (Нью Хейвен: Йель Юниверсити Пресс, 1977).) В 1925 году статья Р.Н. Гоша, индийского ученого, пишущего на английском языке, была опубликована в «Цайтшрифт фюр Физик» (главное издание Немецкого физического общества) даже без перевода на немецкий язык. Это также спровоцировало проявление ксенофобии Ленарда, который повесил на своей двери записку: «Вход для евреев и членов Немецкого физического общества запрещен».

7. «В целом можно сказать, что среди больших проблем едва ли найдется одна, которыми так богата современная физика, в которую Эйнштейн не внес бы свой выдающийся вклад. То, что он мог иногда "промахнуться" в отношении своих гипотез, как, например, с гипотезой о световых квантах, ни в коей мере не может повредить ему, потому что невозможно выдвигать новые идеи, даже в самых точных науках, не решившись иногда на риск». Заявление в поддержку выдвижения Эйнштейна в члены Прусской академии наук 12 июня 1913 года подписано четырьмя выдающимися немецкими физиками, включая Планка.

8. Итак, возвратимся к нашему примеру с падающим камнем: если его масса была 1 кг и он падал с высоты 5 м, действие будет определяться величиной 10^{35} раз *h*!

9. Например, хоть и невозможно определить, когда произойдет распад какого-нибудь одного радиоактивного атома, можно установить с очень высокой степенью точности, что по прошествии 29 лет половина очень большого числа атомов в макроскопическом образце радиоактивного стронция подвергнется распаду.

10. Квантовая механика была разработана в 1925 году Гайзенбергом и Шредингером, работавшими независимо; и что удивительно, их формулировки казались поначалу совсем разными. Но в математическом отношении они оказались эквивалентными, хотя выглядели непохожими друг на друга. *Волновая механика* Шредингера и *матричная механика* Гайзенберга давали одни и те же прогнозы для всех прикладных систем; каждый может выбирать наиболее удобную форму для решения текущей проблемы.

11. Когда две волны соответствуют друг другу так, что последовательные пики каждой случаются всегда синхронно друг с другом, их называют когерентными. Когерентность является предпосылкой для явления интерференции постоянной волны, которая случается, когда две волны усиливаются или подавляются при наложении или пересечении друг с другом. Декогерентность имеет место в том случае, если волны или перестают «идти в ногу» друг с другом, или «сбиваются с ноги» каким-то внешним вмешательством. Только когда квантовые волновые функции двух состояний являются когерентными, имеет смысл говорить о квантовом наложении этих состояний.

12. Результаты первых экспериментов Аспекта по неравенствам Белла были опубликованы в 1982 году. Его и другие исследовательские группы продолжают экспериментировать и дальше, уточняя и подкрепляя результаты убедительными доказательствами.

13. Если два значения бита (0 или 1) в обычном компьютере представить двумя различными состояниями атома, когерентное наложение этих двух состояний будут представлять оба значения бита в одно и то же время. Это называется кубитом (qubit). Работая с кубитами, квантовый компьютер сможет выполнять множество вычислений одновременно, обеспечив тем самым огромное увеличение скорости. Смотрите также главу 12.

Глава 5

1. В действительности существует более серьезная опасность, чем Земля, «выдавленная» из Солнечной системы: само Солнце со временем разбухнет и поглотит Землю!

2. «У больших вихрей есть маленькие вихри/Которые живут за счет их скорости;/А у маленьких вихрей есть еще меньшие вихри,/И так далее до вязкости». Льюис Ричардсон, из его статьи «Приток энергии от и к атмосферным вихрям».

Глава 6

1. В рекламе поезда Евростар, который следует из Лондона до Парижа по подземному туннелю, говорится: «Как будто по волшебству, появился Париж». Возможно, такой релятивистский взгляд на вещи становится модным!

2. Для любопытных: это $ds^2 = dx^2 - c^2dt^2$.

3. В «Диалогах» Галилея его воображаемый персонаж Сальвиати предлагает Сагредо: «Закройся со своими друзьями в главной каюте под палубами на каком-нибудь большом корабле и возьми с собой несколько мух, бабочек и других летающих животных. Также возьми с собой большой сосудов с рыбками, подвесь бутылку так, чтобы из нее по капле стекала вода в широкую чашу внизу. Когда корабль стоит неподвижно, понаблюдай, как маленькие насекомые летают по каюте с одинаковой скоростью во всех направлениях. Рыбки равнодушно плывут во все направления, капли воды падают в чашу, и бросая что-то своему другу, не надо это делать с большим усилием в одном направлении, чем в другом при равных расстояниях. Подпрыгивая вверх со сложенными вместе ногами, ты преодолеваешь равные расстояния во всех направлениях. После того как ты внимательно понаблюдаешь за всем этим (хотя нет сомнения в том, что, когда корабль стоит неподвижно, все должно происходить именно так), перемещай корабль с любой — какой захочешь, скоростью — но при условии, что его скорость равномерна и не отклоняется в ту или иную сторону. И ты увидишь, что ничего не изменится в перечисленных выше действиях, и глядя на это, ты не сможешь сказать, плывет корабль или стоит неподвижно».

(Перевод на английский Сейлсбери [Чикаго: Из-во «Юниверсити оф, Чикаго Пресс», 1953], С.199–200)..

4. Однако Эйнштейн писал: «В моей собственной разработке результат Майклсона не играл значительной роли. Я даже не помню, знал ли я о нем вообще, когда писал свою первую работу по этой теме (1905)». (Письмо к Ф.С. Девенпорту, 9 февраля 1954 года; цитируется А. Паисом в «Subtle is the Lord» (Оксфорд: Оксфорд Юниверсити Пресс, 1982).)

5. *Принцип исключения* Паули является ключом к квантово-механическому объяснению атомной структуры, а значит, химической валентности и Менделеевской периодической таблицы элементов.

6. Нейтрон, например, имеет шанс 50:50 прожить более 10,2 минуты до того, как он распадется, но многие другие частицы живут едва ли столько, чтобы пересечь атомное ядро, даже при скорости движения, близкой к скорости света.

7. Прошу прощения за это уравнение: оно единственное в этой книге (вне примечаний)! В 1905 году Эйнштейн не написал $E = mc^2$ — для обозначения энергии он использовал букву L. И в 1912 году он снова написал $L = mc^2$, но затем зачеркнул L и заменил ее буквой E.

8. Это похоже на то, как если бы при вычислении числа π выдавались последовательные приблизительные значения 3, 3,1, 3,14; 3,142, 3,1416,

3,14159, ..., каждое точнее предыдущего. Заметьте, что 3,14159 = 3 + 1/10 + + 4/100 + 2/1 000 — 4/10 000 — 1/100 000 и каждый элемент в этом расширении меньше предыдущего.

9. Продолжим аналогию с вычислением π. Предположим, что «правила» вычисления дают число 3 как первое приближение, которое является удовлетворительным, но последующее вычисление, которое должно было быть еще точнее, дало $3 + \chi/10$, где χ является бесконечным. Ясно, что это неприемлемо. Предположим тем не менее, что выражение для χ получают, устанавливая на нуль некую величину ρ в выражении $1/[\rho(1 - \rho)]$, которое остается конечным, пока ρ не установят на нуль. Тогда процедура вычитания должна состоять в том, чтобы заменить вышеприведенное выражение на $1/\rho + 1/(1 - \rho)$ и затем отбросить первый элемент — прежде чем устанавливать ρ на нуль. Эта процедура даст $\chi = 1$, что будет «правильным» ответом.

10. Причина, по которой мы чувствуем гравитационную силу Земли (иначе говоря, наш вес) но совершенно не реагируем на электростатические силы, в том, что вся материя земли притягивает всю материю наших тел, в то время как электрические заряды притягиваются, если они противоположно заряжены, и отталкиваются, если их заряды одинаковы. Как наши тела, так и Земля являются нейтральными, при этом отрицательные и положительные заряды взаимно исключают друг друга.

11. Очень большое число 10^{40} возбуждало воображение знаменитых ученых, потому что такое же соотношение получается, если разделить возраст Вселенной (по самым точным подсчетам 13 млрд лет) на время, которое затрачивает свет для пересечения ядра атома. Является ли это простым совпадением? Еще одно очень большое число получают, подсчитав число протонов в видимой Вселенной: оно приближается к 10^{80} — квадрат числа 10^{40}. Еще одно совпадение? В настоящее время у нас нет какого-либо теоретического основания для анализа значения этих чисел, но хотелось бы думать, что они и подобные им числа несут какую-то ключевую информацию о фундаментальной физике.

12. Эксперименты определяют радиус протона, совместимый с этими идеями — около 10^{-15} метров. Для частиц, подобных электрону, он будет намного меньше, но не равен нулю.

Глава 7

1. MIT Пресс, 1965.

2. В «Вопросах для будущего», его статья в книге «*Природа материи*», изд. Дж.Н. Малви (Оксфорд Юниверсити Пресс, 1981).

3. *Квантовая механика,* 3-е изд. (Оксфорд Юниверсити Пресс, 1947).

4. Известен также как основатель современной теории чисел. Его «последняя теорема», написанная на полях его экземпляра «*Арифметики*» Диофанта — «Невозможно разложить полный куб на сумму двух кубов, чет-

вертую степень на сумму двух четвертых степеней, вообще какую-либо степень на сумму двух степеней с тем же показателем. Я точно нашел доказательство этому, но поля очень узкие, чтобы записать его» — не поддавалось доказательству (потому что доказательство Ферма, если оно вообще существовало, так и не было раскрыто) до 1993 г., когда Эндрю Уайлс объявил, что у него есть это доказательство. Это было в конце серии лекций, прочитанных в институте Исаака Ньютона в Кембридже. Но когда он формулировал доказательство для публикации, то обнаружил незначительную ошибку. Еще один год он потратил на то, чтобы «залатать прореху», и в результате невероятного напряжения сил это было опубликовано в 1995 году.

5. Его обратная величина — 137,0359895 — является числом, которое завораживало и сбивало с толку многих физиков. В то время как опыты были еще недостаточно точными, чтобы исключить его, сэр Артур Эддингтон утверждал, что оно было именно $10^2 + 6^2 + 1$. Предлагались другие, более продуманные формулы, но ни одна из них не была убедительной, и поэтому определение его значения на основе более фундаментальной теории остается проблемой будущего. Вольфганг Паули учился в институте Соммерфильда в Мюнхене. Он рассматривал постоянную тонкой структуры в качестве связи с «магико-символическим» миром, который он обсуждал со своим другом С. Г. Юнгом. Паули умер в госпитале Красного Креста в Цюрихе; он говорил, что его беспокоит, что у его комнаты номер 137.

6. Чисто умозрительная величина — это величина, которая при возведении в квадрат дает отрицательный результат — в отличие от реального числа, квадрат которого является положительной величиной. (Как писал У.Х. Оден: «Минус на минус дает плюс/Причину этого мы не должны обсуждать»). Комплексное число — это сумма реального и воображаемого чисел. Квантово-механическая амплитуда является, по сути, комплексной, а комплексные числа играют важную роль во всех разнообразных формулировках квантовой механики.

7. Минковский сказал в 1908 году: «Представления о пространстве и времени, с которыми я хотел бы вас познакомить, возникли на почве экспериментальной физики, и в этом кроется их сила. Они радикальны. Следовательно, пространство само по себе, и время само по себе, обречены превратиться просто в тень, и только некий союз этих двух понятий сохранит независимую реальность».

8. Формулу, выражающую эту связь, $S = k \cdot \log W$, следует искать на его могильном камне (рис. 7.4). В его уравнении S означает энтропию, а W — вероятность состояния. Вероятность пропорциональна числу микросостояний, соответствующих данному макросостоянию. Например, можно предположить количество разнообразных расположений в пространстве молекул газа. Постоянная k названа именем Болтцмана.

9. Она была предложена в 1957 году Хьюго Эвереттом III в его докторской диссертации.

Глава 8

1. Это обсерватория Пьера Огера, которая состоит из двух детекторных установок, одна из которых находится в штате Юта в США, а другая — в Аргентине, причем они расположены так, чтобы охватить весь небосвод. Каждая установка будет содержать 1600 детекторов частиц, развернутых на площади более 3000 кв. км.

2. Единица является постоянной Планка, разделенной на число 2π.

3. Один такой эксперимент под названием K2K начал собирать данные в 1999 году. Нейтрино, полученные на синхротронном ускорителе, управляемом научно-исследовательской организацией по высокоэнергетическому ускорению (КЕК) в городе Цукуба, направленно передаются к «Японским Альпам» для считывания детектором Супер-Камиоканде, который установлен на расстоянии 250 км в городке Камиока. Затем команда японско-корейско-американских ученых, участвующих в этом эксперименте, занимается поиском возможных воздействий, вызванных нейтринными колебаниями, сравнивая измерения Супер-Камиоканде с измерениями фронтального детектора КЕК.

4. Здесь необходимо сделать предупреждение! Совершенно в стороне от возможных экзотических форм материи, неопровержимые доказательства динамики движения как звезд внутри галактик, так и самих галактик в пределах галактических кластеров дают нам представления о том, что масса видимых звезд лишь в малой степени участвует в общей массе материи во Вселенной.

5. Это от греческого слова *leptos,* небольшой, так как электрон и мю-мезон имеют меньшую массу, чем у протона.

6. От греческого *hadros* — толстый, массивный.

7. Мюррей Гелл-Манн взял название *кварк* из стихотворения, открывающего главу 4 в книге 2 «Пробуждения Финнегана»: «Три кварка для мастера Марка!» Произношение обычно рифмуется со словом «парк» в Европе, но в США со словом «порк» (свинина). В частном письме к редактору Оксфордского словаря английского языка (от 27 июня 1978года) Гелл-Манн писал: «Я использовал звук “кворк” в течение нескольких недель в 1963 году, прежде чем заметил “кварк” в «Пробуждении Финнегана», которого я перелистываю время от времени с момента его появления в 1939 году... Я вынужден извиниться за сохранение произношения “кворк”, несмотря на то что в “Финнегане” встречаются рифмующиеся слова “Марк”, “барк”, “марк” и т.д. Я нашел это извинение, предполагая, что один элемент строки “Три кварка для мастера Марка” был выкриком «Три кворты для г-на...», который я слышал в пабе “Х.С.Иеруикер”».

8. Например, сложный рисунок линий в спектре атомов и молекул можно классифицировать согласно принципам симметрии, которые помогают сделать подробный анализ основных физических процессов. Те же самые идеи распространяются и на классификацию и понимание элементарных частиц и их взаимодействия.

9. Это SU(3)⊗SU(2)⊗U(1), где первый показатель ассоциируется с сильным взаимодействием, а другие — со слабым уровнем электрической силы. Уверяю вас, что на самом деле это проще, чем кажется!

10. Аппаратура, которую они использовали, первоначально предназначалась для совершенно другого эксперимента — для измерения распадов переходного состояния двух пионов — но они прекрасно приспособили ее для своих целей.

Глава 9

1. Физики используют понятие *ускорения* для любого изменения скорости, и не только самой скорости, но и ее вектора.
2. А. Эйнштейн, «*Смысл теории относительности*» (Принстон: Принстон Юниверсити Пресс, 1950) С. 59.
3. Он также попытался определить скорость света, подавая сигналы лампами между соседними вершинами в горах Гартца!
4. *Пространство, время и гравитация: очерк общей теории относительности* (Кембридж Юниверсити Пресс, 1920).

Глава 10

1. С экспериментальной точки зрения кварки и лептоны стандартной модели не имеют явной структуры, даже на уровне самых мелких исследуемых масштабов. Они подобны точкам даже на уровне 10^{-19} метров.
2. Мне нравится такой способ описания теории, который оставляет мало места для внесения произвольных поправок, и я с большой признательностью одалживаю его у Стивена Вайнберга. Он использует его в своей книге «*Мечты о конечной теории: Поиски фундаментальных законов природы*» (Радиус Хатчинсона, 1993).
3. Если точнее, уплотнение на круге радиуса R эквивалентно уплотнению на круге радиуса lp^2/R, где lp = длине Планка.
4. Это еще одно из интригующих «больших чисел»: $(10^{60})^2 = (10^{40})^3$.

Глава 11

1. Выражаясь более точно, величина, которую я буду называть размером Вселенной, является масштабным множителем, который имеет значение даже для открытой, бесконечной Вселенной.
2. «Одни говорят, что мир погибнет в огне, / Другие говорят, что во льду». Из книги «*Поэзия Роберта Фроста*» (Нью-Йорк: Хольт, Райнхарт и Уинстон, 1969).

3. Что означает искривление Вселенной? Прямая линия может определять самое короткое расстояние между двумя точками, а треугольник составлен из трех прямых линий. В евклидовой геометрии сумма углов треугольника всегда равна 180°, но это необязательно должно быть так. Например, на поверхности сферы (со сторонами треугольника, лежащими на поверхности как большие круги на поверхности Земли) сумма углов будет больше 180°, в то время как на поверхности седла сумма будет меньше 180°. «Плоская» Вселенная — это Вселенная евклидовой геометрии. В евклидовой геометрии объем, заключенный в сферах с увеличивающимся радиусом, растет пропорционально кубу этого радиуса, в открытой геометрии замкнутый объем растет быстрее этого объема, а в закрытой — медленнее.

4. Сахаров сыграл главную роль в разработке советской водородной бомбы. Позднее он стал лидером правозащитного движения в СССР и в 1975 году получил Нобелевскую премию мира. Его откровенные высказывания способствовали все более углубляющемуся конфликту с властями, и когда он выступил против войны с Афганистаном, то был сослан в Горький (теперь опять Нижний Новгород) и ему было запрещено контактировать с другими учеными. Международная кампания за прекращение этих преследований закончилась успехом только через семь лет, когда президент Горбачев позвонил Сахарову в Горький и предложил ему вернуться в Москву и «снова заняться вашим патриотическим делом».

5. Этот вывод исходит из наблюдений на установке Камиоканде. Эксперименты ведутся в шахте Моцуми фирмы Камиока Майнинг энд Смелтинг Компани. Эксперимент Камиоканде был первоначально разработан для исследования распада нуклеона. Еще одним важным результатом эксперимента в Камиока было обнаружение нейтрино от сверхновой 1987А, который стал вестником нового вида астрономии. В усовершенствованной версии детектора Камиоканде было обнаружено доказательство наличия массы у нейтрино.

Глава 12

1. Химики могли бы возмутиться неудачной (на самом деле не характерной для него) нескромностью Поля Дирака, который писал по поводу квантовой механики, что «следовательно, основные физические законы, необходимые для математической теории большой части физики и всей химии, полностью известны, и трудность только в том, что точное применение этих законов ведет к уравнениям, слишком сложным для решения». (*«Труды Королевского Общества Лондона»*, сер. А, (1929): 714). Но правда в том, что никакие новые законы физики не нужны для объяснения химии теперь, когда мы сформулировали законы квантовой механики.

2. Политики порой не утруждают себя разделением категорий. «Коммунизм — это советская власть плюс электрификация всей страны». В.И. Ленин, Доклад на VIII съезде Коммунистической партии (1920).

3. Согласно заявлению Р. Стенли Уильямса из Лабораторий Хьюлит Паккард: «Количество информации, которое люди смогут нести с собой в качестве вспомогательной памяти [используя нанотехнологию], будет эквивалентно по содержанию всем когда-либо написанным книгам».

Мир физики, декабрь 1999. С. 51.

4. *Лазер* — это акроним от «Усиление света стимулированной эмиссией излучения» (Laser amplification by stimulated emission of radiation). Микроволновой аналог был продемонстрирован раньше, в 1954 году.

5. Эффект, использованный в кольцевом лазерном гироскопе, назван по имени Жоржа Саньяка, который измерил интерференцию во вращающемся интерферометре в 1913 году, но идея использовать интерферометр для измерения вращения Земли восходит к 1893 году и выдвинута Оливером Лоджем и Джозефом Лармором, о которых мы говорили в главе 2. Паули говорил об эффекте Саньяка, что он, по существу, является оптическим аналогом маятника Фуко. И, как у маятника Фуко, соответствующий коэффициент зависимости от широты получается в таком же кольцевом лазере в Германии, измеряющем другую частоту.

6. Они основаны на явлении, который исследовал более века назад Пьер Кюри. Пьезоэлектрические материалы изменяют свою форму под действием электрического напряжения и, наоборот, генерируют электрическое напряжение при сжатии. Пьезоэлектричество производит искры, которые часто используются для зажигания газа кухонных плит, а также в тренировочной обуви. Когда ваша походка становится тяжелой, вспышки света становятся красными.

Глава 13

1. В последние месяцы 2000 года опыты на ускорителе LEP в CERN дали некоторые доказательства существования частицы Хиггса, но их было слишком мало, чтобы доказательства могли считаться неопровержимыми. В администрации CERN мучительно раздумывали, продолжать ли сбор данных в следующем году, но решили этого не делать, потому что пришлось бы отложить запланированное закрытие LEP, чтобы предоставить свой туннель для сооружения LHC. Руководство продлило программу LEP еще на один месяц, но полученные дополнительные данные были недостаточно убедительными, чтобы преодолеть недоверие экспериментаторов. Им пришлось с неохотой уступить свое лидерство в гонке по поиску частицы Хиггса Соединенным Штатам, где эту гонку теперь возглавляет лаборатория Фермилаб.

2. Например, в CERN и в RHIC (релятивистский ускоритель тяжелых ионов) в Брукхевн Нэшнл Лаборатори на Лонг Айленд.

3. Планируется такой же эксперимент с длинной базисной линией, в котором нейтринный луч из CERN будет направлен под Альпами к детектору на расстояние 732 км, расположенному в подземной лаборатории рядом с туннелем Гран Сассо на скоростном шоссе, соединяющем Терамо с Римом.

А упомянутый в главе 8 эксперимент K2K уже приносит плоды: нейтрино, генерированные на ускорителе KEK, были обнаружены в Камиока. Серьезная авария 12 ноября 2001 года разрушила более половины фотоумножителей в детекторе Супер-Камиоканде, но они будут заменены, чтобы продолжить эксперимент.

4. Аристотель в своей книге «*На небесах*» добавил к уже известным четырем элементам (Земля, воздух, огонь, вода) пятый элемент, который традиционно использовался для описания материи в сферах, расположенных ниже Луны. Это была неразрушаемая субстанция небесной сферы, которую он назвал квинтэссенцией.

ГЛОССАРИЙ

Античастица (Antiparticle) — релятивистская квантовая теория поля предсказывает, что каждому виду частицы соответствует двойник, имеющий ту же массу, но противоположный электрический заряд (а также противоположные свойства других свойств заряда). Например, электрон и позитрон являются частицей и античастицей относительно друг друга. Некоторые виды нейтральных частиц идентичны своим античастицам, например фотон.

Атом (Atom) — самая маленькая частица химического элемента. Атом имеет ядро, состоящее из протонов и нейтронов, окруженных электронами, расположение которых определяет химические свойства атома.

Белый карлик (White dwarf) — остаток звезды после коллапса; «белый» — потому что она продолжает сиять ярким белым светом, а «карлик» — потому что оставаясь такой же массивной, как звезда, еще не израсходовавшая своего термоядерного топлива, она имеет во много раз меньший размер.

Большой взрыв (Big bang) — катастрофическое событие, произошедшее, вероятно, 10^{10} лет назад и положившее начало жизни во Вселенной.

Водород (Hydrogen) — элемент с самой простой структурой атома: один электрон, связанный с ядром, состоящим из одного протона.

Волновая механика (Wave mechanics) — формулировка квантовой механики Шредингера, в которой математика связана с волнами.

Волны(Waves) — термин, используемый в физике для описания чего-нибудь, регулярно повторяющегося в пространстве и времени. Волновые явления можно найти почти во всех отраслях физики.

Галактика (Galaxy) — скопление звезд, обычное число которых достигает 10^{11}.

Гамма-лучи (Gamma rays) — электромагнитное излучение очень высокой частоты, превышающей частоту рентгеновского излучения. Гамма-лучи тесно связаны с квантовыми переходами между различными энергетическими состояниями атомного ядра, но они могут быть также генерированы другими высокоэнергетическими процессами.

Гравитация (Gravity) — сила тяготения, присутствующая повсюду, также между всеми массивными объектами. Наиболее известная из фундаментальных сил — сила тяготения, притягивающая нас к земле, является тем, что мы ощущаем как наш вес.

Действие (Action) — фундаментальная величина в механике, на основании которой можно получить движение динамической системы. Она занимает центральное место в аналитическом подходе к классической механике и имеет такое же значение для квантовой механики. Постоянная Планка тесно связана с квантованием действия.

Длина волны (Wavelength) — расстояние между двумя вершинами в череде волн определенной частоты.

Излучение черного тела (Black body radiation) — электромагнитное излучение, испускаемое абсолютно черным телом; спектр излучения зависит только от температуры тела.

Интерференция (Interference) — явление, с помощью которого волны, встречаясь друг с другом, или усиливают друг друга (конструктивная интерференция, при которой впадина совпадает с впадиной, а вершина с вершиной), или подавляют друг друга (деструктивная интерференция, при которой впадина совпадает с вершиной).

Интерферометр (Interferometer) — устройство, использующее явление интерференции для измерения небольших смещений. Его также используют для точного измерения длины волны.

Квазар (Quasar) — акроним от квази-звездного радиоисточника: яркие астрономические источники радиоволн, которые являются такими компактными, что воспринимаются как точки или звезды. Их считают интенсивно активными отдаленными галактиками.

Квант (Quantum) — дискретное количество энергии — элементарное возбуждение поля.

Квантовая механика (Quantum Mechanics) — общие законы, лежащие в основе поведения физических систем. Законы квантовой механики значительно отличаются от законов классической механики в объяснении явлений на микроскопических уровнях, таких как уровень атомов.

Классическая физика (Classical physics) — физика, как ее понимали до появления квантовой теории и теории относительности Эйнштейна.

Когерентность (Coherence) — свойство, приписываемое волнам, которые синхронны друг другу так, что их впадины и вершины совпадают в пространстве и времени.

Космическое микроволновое фоновое излучение (Cosmic microwave background radiation) — тепловое излучение черного тела, которое пронизывает Вселенную, порожденную большим взрывом и теперь имеющую температуру 2,7 К.

Космология (Cosmology) — изучение общей структуры Вселенной, ее происхождения и эволюции.

Лазер (Laser) — устройство, которое производит свет благодаря действию многих атомов, причем атомы действуют не независимо, а во взаимодействии друг с другом. Свет из лазера является, как правило, монохромным (то есть он имеет резко выраженную длину волны) и может быть очень интенсивным.

Матричная механика (Matrix mechanics) — формулировка квантовой механики Гейзенберга, в которой механика связывается с матрицами.

Молекула (Molecule) — химически связанная группа атомов.

Нейтрон (Neutron) — одна из частиц, составляющих атомное ядро. Электрически нейтральная.

Нейтронная звезда (Neutron star) — обрушившаяся звезда, состоящая в основном из нейтронов. По размеру она похожа на Землю, но ее масса подобна массе Солнца, поэтому ее плотность является огромной и сравнима с плотностью атомного ядра.

Позитрон (Positron) — античастица электрона.

Поле (Field) — физическое свойство, растянутое в пространстве и времени.

Постоянная Планка (Planck's constant) — одна из фундаментальных постоянных величин, характерных для квантовой механики, введенная Максом Планком в его объяснение спектра излучения черного тела. Она определяет уровень квантового явления.

Пространство-время (Spacetime) — объединение пространства и времени в теории относительности Эйнштейна.

Протон (Proton) — одна из частиц, составляющих атомное ядро. Несет одну единицу положительного заряда. Ядро атома водорода является протоном.

Пульсар (Pulsar) — звезда, наблюдаемая как постоянно пульсирующий объект. Считается, что пульсары — это вращающиеся нейтронные звезды.

Радиоактивность (Radioactivity) — процесс, при котором атомное ядро спонтанно испускает энергетическую частицу и поэтому становится ядром атома с другими химическими свойствами.

Редукционизм (Reductionism) — научный метод, который стремится объяснить сложные явления с помощью более простых и более общих основных законов.

Рентгеновские лучи (XRays) — электромагнитное излучение с длиной волны намного короче, чем у ультрафиолетового излучения.

Сверхпроводимость (Superconductivity) — явление, при котором при низкой температуре некоторые материалы полностью теряют сопротивление прохождению электротока.

Сдвиг к красному спектру (Redshift) — смещение характерных линий в спектре в сторону более длинных волн. Он связан с удалением источника относительно детектора.

Спектр (Spectrum) — диапазон частот излучения, наблюдаемый в физическом процессе. Спектр электромагнитного излучения растягивается в обоих направлениях, выходя за пределы видимой частоты всех цветов радуги, то есть опускаясь ниже низкой частоты красного света и поднимаясь выше высокой частоты фиолетового. За красным следует инфракрасный и затем микроволны и излучение, используемое в телевидении и радиопередачах. На другом конце, с частотами выше, чем у видимого света, идет ультрафиолетовое, рентгеновское и гамма-излучение. Так как квантовая механика связывает частоту с энергией, можно также сослаться на энергетический спектр.

Теория относительности (Relativity) — теория, которая описывает, как разные наблюдатели представляют одни и те же события относительно своих

систем отсчетов. Относительность по Галилею отсылает к доэйнштейновской теории, в которой наблюдатели движутся относительно друг друга с постоянной скоростью по прямой линии. Специальная теория относительности Эйнштейна модифицирует это так, чтобы теория была совместима с универсальным постоянством скорости света, которая является необходимым условием теории электромагнетизма Максвелла. Общая теория относительности Эйнштейна распространяется на наблюдателей, находящихся в относительном ускоренном движении, и включает также теорию гравитации.

Теория струн (String theory) — теория, в которой элементарные составляющие материи рассматриваются в виде вытянутых объектов, похожих скорее на струны, чем на частицы.

Термодинамика (Thermodynamics) — теория передачи тепла. Теория занимается в основном столкновением и взаимодействием частиц и излучением в больших, близких к равновесию, системах.

Термоядерный синтез (Thermoneuclear fusion) — слияние атомных ядер (обычно водородных и других легких ядер) во время их столкновения при температурах, которые бывают в центре звезд. Масса, потерянная в этом процессе, преобразуется в энергию.

Траектория (Trajectory) — путь в пространстве, по которому следует снаряд. В общих чертах путь точки, представляющей конфигурацию динамической системы по мере ее прохождения сквозь фазовое пространство.

Транзистор (Transistor) — устройство, использующее квантово-механические свойства некоторых материалов для контроля над электрическими процессами.

Ультразвук (Ultrasound) — волны, похожие на звуковые, но более высокой частоты, которая выходит за пределы человеческого восприятия.

Фазовое пространство (Phase space) — абстрактное пространство, точки которого идентифицируются с состоянием динамической системы.

Фотон (Photon) — квант электромагнитного излучения.

Хаос (Chaos) — Область физики, занимающаяся нелинейными системами, отличающимися необычайной чувствительностью к исходному состоянию.

Циклотрон (Cyclotron) — устройство для генерирования луча элементарных частиц. Они следуют по спиральной траектории между полюсами магнита, вдоль которого частицы ускоряются благодаря изменению напряжения электрического поля.

Черная дыра (Black Hole) — зона пространства, из которой, согласно установкам общей теории относительности, ничего не может появиться из-за непреодолимой силы тяготения. Возможный результат звездной эволюции для достаточно массивных звезд.

Электродинамика (Electrodynamics) — взаимодействие электрических зарядов и электромагнитного поля.

Электромагнетизм (Electromagnetism) — Комбинация электрических и магнитных явлений, впервые объединенных Максвеллом в его теории электромагнитизма.

Электрон (Electron) — Одна из элементарных частиц и первая, которую открыли; составляющая всех атомов. Число отрицательно заряженных электронов, необходимых для уравновешивания положительного заряда ядра атома, определяет химические свойства атома.

Энергия (Energy) — Способность выполнять работу.

Энтропия (Entropy) — Термодинамическая величина, связанная со степенью беспорядка в макроскопическом состоянии.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Abbott, Edwin A. *Flatland: A Romance of Many* Dimensions. Mineola, N.Y.: Dover Books, 1992.

Allday, J. Quarks, *Leptons and the Big Bang.* Bristol, U.K.: Institute of Physics Publishing, 1997.

Ball, Philip. *Made to Measure: New Materials for the* 21st *Century.* Princeton, N.J.: Princeton University Press, 1999.

Blair, David, and Geoff McNamara. *Ripples on a Cosmic Sea: The Search for Gravitational Waves.* Reading, Mass.: Perseus Books, 1999.

Close, Frank. *Lucifer's Legacy: The* Meaning *of Asymmetry.* Oxford: Oxford University Press, 2000.

Cohen, Jack, and Ian Stewart. *The Collapse of Chaos: Discovering Simplicity in a Complex World.* New York: Penguin Books, 1995.

Ferris, Timothy. *The Whole Shebang: A* State-of-tne-Universe(s) *Report.* New York: Touchstone Books, 1998.

Feynman, Richard P. QED: *The* Strange *Theory of Light and Matter.* Princeton, N.J.: Princeton University Press, 1988.

Fowler, T. Kenneth. *The Fusion Quest.* Baltimore, Md.: Johns Hopkins University Press, 1997.

Fraser, Gordon. *Antimatter — the Ultimate Minor.* Cambridge: Cambridge University Press, 2000.

Fritzsch, Harald. An *Equation That Changed the World: Newton, Einstein and the Theory of Relativity.* Chicago: University of Chicago Press, 1997.

Gamow, George. Mr. *Tompkins in Paperback.* Cambridge: Cambridge University Press, 1993.

Greene, Brian. *The Elegant Universe: Superstrings, Hidden Dimensions, and the Quest for the Ultimate Theory.* New York: W. W. Norton and Company, 1999.

Gribbin, John R. *Case of the* Missing *Neutrinos: And Other Curious Phenomena of the Universe.* New York: Fromm International, 1998.

Gribbin, John R., et al. Q Is *for Quantum: An Encyclopedia of Particle Physics.* New York: Free Press, 1999.

Gribbin, John R., and Simon Goodwin. Origins: Our *Place in Hubble's Universe.* Woodstock, N.Y.: Overlook Press, 1998.

Gribbin, John, and Mark Chimsky, eds. *Schrodinger's Kittens and the Search for Reality.* New York: Little, Brown and Company, 1996.

Gross, Michael. *Travels to the Nanoworld: Miniature Machinery in Nature and Technology.* New York: Plenum Press, 1999.

Guth, Alan H., and Alan H. Lightman. *The Inflationary Universe: The Quest for a New Theory of Cosmic Origins.* Reading, Mass.: Perseus Books, 1998.

Hall, Nina, ed. *Exploring Chaos: A Guide to the New Science of Disorder.* New York: W. W. Norton and Company, 1993.

Hawking, Stephen. A *Brief History of Time: The Updated and Expanded Tenth Anniversary Edition*. New York: Bantam Books, 1998.

Hoskin, Michael, ed. *The Cambridge Illustrated History of* Astronomy. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.

Kaku, Michio. *Hyperspace: A Scientific Odyssey through* Parallel *Universes, Time Warps and the Tenth Dimension*. New York: Anchor Books, 1995.

Visions: How; Science Will *Revolutionize the 2lst Century*. New York: Bantam Books, 1998.

Kane, Gordon, and Heather Mimnaugh. *The Particle Garden: Our Universe as Understood by Particle Physicists*. Reading, Mass.: Perseus Books, 1996.

Lindley, David. *Where Does the* Weirdness Go? *Why Quantum Mechanics Is Strange, but Not as* Strange as *You Think*. New York: HarperCollins, 1997.

Morrison, Philip, Phyllis Morrison, Charles Eames and Ray Fames. Powers *of Ten*. New York: W. H. Freeman and Company, 1995.

Rees, Martin. *Before the* Beginning: Our Universe and Others. Reading, Mass.: Perseus Books, 1998.

Ruelle, David. *Chance and Chaos*. Princeton, N.J.: Princeton University Press, 1993.

Smolin, Lee. *The Life of the Cosmos*. New York: Oxford University Press, 1999.

Smoot, George, and Keay Davidson. *Wrinkles in Time*. New York: Avon Books, 1994.

Treiman, Sam. *The Odd Quantum*. Princeton, N.J.: Princeton University Press, 1999.

Weinberg, Steven. *Dreams of a Final Theory*. New York: Vintage Books, 1994.

The First Three Minutes: A Modem View of the Origin of the Universe, New York: Basic Books, 1993.

Заявки на книги присылайте по адресу:
125319, Москва, а/я 594
Издательство «Техносфера»
e-mail: knigi@technosphera.ru
sales@technosphera.ru
факс: (495) 956 33 46

В заявке обязательно указывайте
свой почтовый адрес!

Подробная информация о книгах на сайте
http://www.technosphera.ru

Чарап Джон М.

Объяснение Вселенной.
Новая эра физики

Компьютерная верстка – А.В. Бабич
Дизайн – И.А. Куколева
Корректор – О.А. Ильинская
Редактор – Н.Е. Евдокимова
Выпускающий редактор – М.В. Капранова
Ответственный за выпуск – С.В. Зинюк

Формат 70x100/16. Печать офсетная.
Гарнитура Ньютон
Печ.л. 12. Тираж 2000 экз. Зак. № 170
Бумага офсет №1, плотность 65г/м^2 ,
цветная вклейка – мелованная 115 г/м^2

Издательство «Техносфера»
Москва, Лубянский проезд, 27/1

Диапозитивы изготовлены ООО «Европолиграфик»

Отпечатано в ППП «Типография «Наука»
Академиздатцентра «Наука» РАН
121099 Москва, Шубинский пер., 6

Джон М. Чарап – профессор кафедры теоретической физики колледжа королевы Марии и Уэстфилда в Лондонском университете, признанный во всем мире специалист по физике частиц.

Джон Чарап предлагает панорамный обзор физического мира, каким мы его видим в начале XXI столетия, что полностью меняет наши представления, сложившиеся в XX веке. Мы выяснили, что Вселенная состоит из биллионов галактик – больше, чем мы могли себе вообразить (!) – и она на биллионы лет старше, чем мы думали. Мы все больше узнаем о том, какой она становится. Благодаря открытиям в области физики мы живем в мире большей опасности и большего комфорта, меньших физических частиц и большего количества идей.

Чарап представляет эти идеи, но избавляет нас от связанных с ними математических выкладок. После исчерпывающего обзора трансформации физической науки в XX столетии он обращается к последним данным физики частиц, астрофизики, теории хаоса и космологии. Его научный экскурс включает в себя анализ непрерывных попыток найти исчезающую материю Вселенной и просчитать первые моменты после большого взрыва. Подводя читателей к самому краю спекулятивных идей, он объясняет, каким образом теория суперструн может в конечном итоге объединить квантовую механику с общей теорией относительности, чтобы создать универсальную квантовую теорию.

В соответствии с этой задачей Чарап ставит вопросы, которые продолжают определять ход исследований. Почему Вселенная плоская? Почему мы не в состоянии более точно предсказывать погоду? Может ли на самом деле кот Шрёдингера быть одновременно жив и мертв? Почему закономерности фрактальной геометрии постоянно проявляются в странных местах? Может ли пространство-время иметь одиннадцать измерений? Что говорит квантовая механика о причинах возникновения нашего мира?

Прочитав эту книгу, человек, далекий от физики, познакомится с общим принципом неопределенности Гайзенберга, а физики могут узнать что-то новое. Студенты получат доступ к спорным физическим концепциям, а поэты усвоят новую лексику, чтобы затем описать множество чудес во Вселенной. Проделав с нами мысленный путь от ультра-фиолетовой катастрофы, опрокинувшей ньютоновский мир, до Всеобщей теории завтрашнего дня, Чарап приблизил самые захватывающие современные научные знания к Земле, и мы все можем узнать об этих новых открытиях.



